

ТЕХНИКА ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС

Под редакцией доктора техн. наук проф. Н. И. БАСОВА
и доктора техн. наук В. БРОЯ



МОСКВА ХИМИЯ 1985

Техника переработки пластмасс/Под ред. Н. И. Басова и В. Броя.— Совместное издание СССР и ГДР (Издательство «Дейтчер Ферлаг Фюр Грундштоффиндустри, г. Лейпциг).— М.: Химия, 1985. — 528 с., ил.

Рассмотрены все основные методы переработки полимерных материалов. Особое внимание уделено расчету перерабатывающего оборудования, основных параметров процесса и их влиянию на свойства и качество готового изделия.

Для инженерно-технических и научных работников, занимающихся переработкой пластмасс, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

528 с., 348 рис., 227 литературных ссылок.

Рецензент: зав. кафедрой полимерного машиностроения
ЯПИ докт. техн. наук, проф. *Н. Г. Бекин*

Авторы из СССР: Н. И. БАСОВ, В. С. КИМ, Ю. В. КАЗАНКОВ, В. К. СКУРАТОВ, В. В. СКАЧКОВ, В. А. МИРОНОВ, И. И. ФЕЛИПЧУК, К. А. САЛАЗКИН, В. А. ЛЮБАРТОВИЧ, М. А. ШЕРЫШНЕВ, М. С. МАКАРОВ

Авторы из ГДР: В. БРОЙ, В. БУРГХАРДТ, Д. КАСПАР, Ф. ЭНДЛЕР, Х.-Д. ФИШЕР, Х. КРАУЗЕ, Х. ШИФЕР, А. ШИМЕНЦ, В. ШУБЕРТ

Т $\frac{2803090000-094}{050(01)-85}$ 94.85

© Издательство «Химия», 1985 г.

Предисловие редактора	8
ГЛАВА 1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	10
1.1. Методы предварительной подготовки сырья	10
1.2. Основные методы переработки полимеров	13
1.3. Завершающие методы	18
ГЛАВА 2. РЕОЛОГИЯ ПОЛИМЕРОВ	19
2.1. Основные понятия	20
2.2. Реологические законы вязких жидкостей	27
2.2.1 Реологические «простые» жидкости	28
2.2.2 Реологические уравнения дифференциального типа	29
2.2.3 Реологические уравнения интегрального типа	30
2.2.4 Реологические уравнения, основанные на молекулярной теории	30
2.2.5 Вязкость полимерных смесей	32
2.2.6 Зависимость вязкости от температуры и давления	35
2.2.7 Зависимость вязкости от молекулярной массы	38
2.2.8 Приборы для исследования реологических свойств	40
2.3. Течение жидкостей через каналы простой геометрической формы	43
2.4. Реологические свойства реактопластов и резиновых смесей	48
2.5. Реологические свойства высоконаполненных полимерных композиций	54
2.6. Особенности реологических свойств композиционных материалов с длиноволокнистым наполнителем	60
2.7. Рекомендации по расчету процессов изотермического течения расплавов полимеров через каналы различной геометрии	72
ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	79
3.1. Назначение подготовительного производства	79
3.2. Способы и особенности совмещения исходных компонентов	80
3.3. Теория смешения сыпучих материалов, высоковязких жидкостей	84
3.3.1. Математическое описание качества смесей	84
3.3.2. Смешение при произвольной деформации сдвига	90
3.4. Оборудование подготовительного производства	93
3.4.1. Оборудование для смешения	93
3.4.2. Оборудование для диспергирования (измельчения)	99
3.4.3. Прочее оборудование подготовительного производства	100
3.5. Диспергирование в процессах получения и переработки полимеров	106
3.5.1. Оценка получаемой смеси	106

3.5.2. Механизм и основные показатели процесса диспергирования	109
3.5.3. Диспергирование волокнистого наполнителя при экструзии	114
ГЛАВА 4. ЭКСТРУЗИЯ ТЕРМОПЛАСТОВ	119
4.1. Переработка полимеров в одночервячных экструдерах	119
4.1.1. Общая характеристика процесса	119
4.1.2. Анализ работы зоны загрузки	122
4.1.3. Описание процессов, протекающих в зоне плавления	128
4.1.4. Гидродинамика потоков и производительность зоны дозирования	133
4.1.5. Мощность, потребляемая экструдером	137
4.1.6. Характеристика экструдера и развиваемое им давление	140
4.1.7. Процессы смешения в одночервячном экструдере	143
4.1.8. Экструдеры со специальными функциональными зонами	148
4.1.9. Конструктивное оформление одночервячных экструдеров	152
4.1.10. Технология экструзии в одночервячном экструдере	159
4.2. Переработка полимеров в двухчервячных экструдерах	164
4.2.1. Назначение, принцип работы и классификация двухчервячных экструдеров	164
4.2.2. Качественный анализ работы двухчервячных экструдеров	166
4.2.3. Эпюры скоростей потока вязкой жидкости и давления в винтовых каналах и зазорах зацепления червяков	168
4.2.4. Теоретическое описание процессов течения в С-образных секциях винтовых каналов червяков и в зазорах зацепления	176
4.2.5. Вывод уравнений для расчета производительности двухчервячных экструдеров со встречным и однонаправленным вращением червяков	184
4.2.6. Технология экструзии в двухчервячных экструдерах	191
4.3. Формующие инструменты экструдеров (экструзионные головки)	195
4.4. Экструзионные линии	200
4.4.1. Агрегаты для гранулирования	200
4.4.2. Экструзионные линии для производства профилей и труб	202
4.4.3. Экструзионные линии для производства листов и плоских пленок	205
4.4.4. Экструзионные агрегаты для производства рукавных пленок	207
4.4.5. Экструзионные линии для нанесения полимерных покрытий	208
4.5. Получение объемных изделий экструзией с раздуванием	209
4.5.1. Общая характеристика процесса	209
4.5.2. Методы производства объемных изделий раздуванием	211
4.5.3. Классификация машин для производства объемных изделий раздуванием	215
4.5.4. Компонировка и основные механизмы агрегатов	217
4.5.5. Формующий инструмент	220
4.5.6. Раздувные формы	227
4.5.7. Приемные устройства	236
4.5.8. Технология получения и раздувания экструзионной заготовки	238
4.5.9. Испытания объемных изделий	241
4.5.10. Методика расчета агрегата	242
ГЛАВА 5. ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ	243
5.1. Способы пластикация материала и подачи его в форму	245
5.2. Способы формования	251
5.2.1. Литье под давлением	251

5.2.2. Интрузия	255
5.2.3. Литьевое прессование	258
5.3. Процесс червячной пластикации	264
5.3.1. Требования к дозе расплава, подготовленной к впрыску	264
5.3.2. Процессы, протекающие в канале червяка	268
5.3.3. Процессы, протекающие в дозе расплава	283
5.4. Процессы, протекающие в форме на этапе впрыска	286
5.4.1. Заполнение формы термопластами	287
5.4.2. Заполнение формы термопластами при вибровоздействии	293
5.4.3. Заполнение формы реактопластами	317
5.5. Процессы, протекающие в форме на этапах выдержки под давлением и отверждения	331
5.5.1. Выдержка под давлением и на отверждение при литье термопластов	331
5.5.2. Выдержка под давлением и на отверждение при литье реактопластов	340
5.6. Режимы переработки пластмасс литьем под давлением	350
5.7. Литьевые машины	353
5.7.1. Общая характеристика современных литевых машин	353
5.7.2. Механизмы смыкания литевых форм	354
5.7.3. Механизмы пластикации и впрыска	357
5.7.4. Привод рабочих органов	360
 ГЛАВА 6. ПРЕССОВАНИЕ РЕАКТОПЛАСТОВ	 365
6.1. Конструкция и классификация прессов	366
6.1.1. Механические прессы	366
6.1.2. Гидромеханические прессы	366
6.1.3. Гидравлические прессы	367
6.2. Уплотнения	369
6.2.1. Поршневые кольца	369
6.2.2. Упругие неразрезные (резиновые) кольца	371
6.2.3. Манжетные уплотнения	372
6.3. Привод гидравлических прессов	374
6.4. Прессы, специализированные по назначению	376
6.4.1. Угловые прессы	376
6.4.2. Этажные прессы	377
6.4.3. Прессы для профильного прессования	379
6.4.4. Прессовые линии с выносными пресс-формами	380
6.5. Прессы-автоматы и роторные линии	381
6.5.1. Однооперационный однопозиционный пресс-автомат	382
6.5.2. Двухоперационный пресс-автомат с червячной пластикацией	384
6.5.3. Прессы-автоматы револьверного типа	384
6.5.4. Роторные линии	385
6.6. Технология прессования	386
6.6.1. Дозирование и загрузка	386
6.6.2. Запирание пресс-формы и отверждение материала	387
6.6.3. Раскрытие пресс-формы, удаление изделий и чистка пресс-формы	388
6.6.4. Технологические параметры прессования	389
6.6.5. Выбор параметров прессования	389
6.6.6. Сравнение методов прямого прессования, литьевого прессования и литья под давлением	396
6.7. Пресс-формы	397
6.7.1. Съемные пресс-формы	397
6.7.2. Полустационарные и стационарные пресс-формы	389
6.7.3. Пресс-формы открытого типа	399
6.7.4. Пресс-формы закрытого и полузакрытого типов	400

6.7.5. Одногнездные и многогнездные пресс-формы	400
6.7.6. Конструирование и изготовление пресс-форм для прямого и литьевого прессования	403
6.7.7. Нагрев пресс-форм	411
6.7.8. Выталкивающие системы пресс-форм	413

ГЛАВА 7. ФОРМОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ ТЕРМО- ПЛАСТОВ 414

7.1. Физические основы формования листовых термопластов	415
7.2. Области применения изделий, отформованных из листовых термо- пластов	416
7.3. Методы переработки листовых термопластов в объемные и плос- кие изделия	418
7.3.1. Классификация. Общие положения	418
7.3.2. Гибка листовых заготовок	420
7.3.3. Нанесение тиснений на листовые полимерные заготовки	422
7.3.4. Формование листовых термопластов путем вытяжки заго- товок	422
7.3.5. Холодное формование листовых заготовок	431
7.3.6. Объемная штамповка листовых термопластов	432
7.3.7. Гидравлическое формование листовых термопластов	433
7.4. Оборудование для формования листовых термопластов	434
7.5. Расчет процесса формования	437
7.6. Расчет элементов формовочных машин	447

ГЛАВА 8. НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ, ТИСНЕНИЕ И КАЛАНДРО- ВАНИЕ 452

8.1. Нанесение покрытий на гибкую основу	452
8.2. Приготовление полимерных пластизолов для нанесения покрытий «мокрым» способом	455
8.3. Приготовление полимерных композиций на основе растворов	457
8.4. Приготовление композиций на основе водной суспензии полимеров	459
8.5. Приготовление композиций на основе мономеров и олигомеров	460
8.6. Другие композиции, применяемые для нанесения покрытий	461
8.7. Технология нанесения полимерных покрытий	461
8.7.1. Нанесение покрытий с помощью раклей	461
8.7.2. Нанесение покрытий с помощью валков	463
8.7.3. Другие способы нанесения покрытий	464
8.7.4. Сушка и желатинизация	465
8.8. Агрегаты для нанесения покрытий	467
8.9. Каландрование пластмасс	468
8.9.1. Приготовление исходных смесей	469
8.9.2. Пластичация исходной смеси	470
8.9.3. Каландрование	473
8.10. Низкотемпературный способ получения пленки на каландрах	477
8.11. Нанесение полимерных покрытий на каландрах	478
8.12. Нанесение тиснений на пленки и слоистые материалы	479

ГЛАВА 9. ПРОИЗВОДСТВО ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ 480

9.1. Особенности формования изделий из стеклопластиков	480
9.2. Технологические свойства стекловолокнистых наполнителей и свя- зующих	482
9.3. Классификация методов формования	487
9.4. Технологические параметры различных методов формования	489

ГЛАВА 10. ФОРМОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ СМОЛ	498
10.1. Оборудование для формования изделий из смол	499
10.2. Формующие инструменты, применяемые при производстве изделий из смол	501
10.3. Технология формования изделий из эпоксидных смол	502
10.3.1. Добавки, применяемые при формовании изделий из эпоксидных смол	504
10.3.2. Подготовительные операции	505
10.3.3. Формование	507
10.3.4. Отверждение и извлечение изделий	510
Л и т е р а т у р а	511

Предлагаемая читателям монография представляет собой совместный труд ученых СССР и ГДР. Книга издается на немецком (в ГДР) и русском (в СССР) языках. В ней обобщены обширные теоретические и экспериментальные данные, представляющие собой обобщение результатов исследований в области переработки полимерных материалов, выполненных на ведущих предприятиях и в ВУЗах ГДР, а также в Московском ордена Трудового Красного Знамени институте химического машиностроения.

Настоящий вариант текста книги отличается от издаваемого в Германской Демократической Республике тем, что в него не вошли справочные данные, соответствующие принятой в ГДР системе стандартов и имеющие аналоги в советской системе ГОСТ. Вместе с тем вся справочная информация, полезная для советских читателей с точки зрения углубления представлений о процессах, протекающих в рабочих органах машин, и о влиянии их на конструктивное исполнение оборудования, его энергосиловые параметры и на качество получаемых изделий, максимально сохранена в тексте авторов из ГДР. Текст советского варианта книги отличается от немецкого также тем, что в него не включен материал советских авторов, опубликованный ими ранее в отечественных изданиях (Оборудование для переработки пластмасс. Справочное пособие по расчету и конструированию. Под ред. Завгороднего В. К. М.: Машиностроение, 1976, 517 с.; *Салазкин К. А., Шерышев М. А.* Машины для формования изделий из листовых термопластов. М.: Машиностроение, 1977, 158 с.; *Ким В. С., Скачков В. В.* Оборудование подготовительного производства заводов пластмасс. М.: Машиностроение, 1977, 183 с.). Изъятие этого материала не нарушило общей последовательности изложения и согласованности информации в рамках каждой главы.

Первая глава является вводной. В ней излагаются общие сведения о тех методах переработки полимерных материалов, которые описаны в последующих главах книги.

Вторая глава посвящена рассмотрению реологических свойств полимерных материалов и композиций на их основе. Особый интерес у советского читателя должны вызвать экспериментальные данные по деформационному поведению и структурным изменениям в процессе течения композиционных материалов с длинноволокнистыми наполнителями.

Вопросы теории и практики подготовительного производства рассматриваются в третьей главе. Большой интерес представляют теоретические основы процессов смешения и диспергирования, от которых во многом зависят физико-механические свойства готовых изделий. Процессам экструзии полимеров в одночервячном, двухчервячном и дисковом экструдерах посвящена четвертая глава. Большое внимание в этой главе уделено

вопросам гидродинамики потока вязких жидкостей в рабочих органах двухчервячных экструдеров и расчету их производительности.

Литью под давлением посвящена следующая, пятая глава. В ней представлено описание современных конструктивно-технологических разновидностей литейного метода, а также излагаются основные закономерности процессов, протекающих в рабочих органах литейных машин. Внимание советского читателя привлекут сведения об интенсификации процесса формования путем вибрационного воздействия на расплав полимера, а также информация о современном приборном оснащении и системах управления литейных машин.

Вопросам техники прессования посвящена шестая глава. Для советских специалистов будет весьма полезным знакомство с опытом, накопленным в ГДР в области технологии прессования термореактивных пресс-материалов.

В седьмой главе, посвященной переработке листовых термопластов, рассматриваются теория и практика процессов получения крупногабаритных изделий методами пневмо- и вакуумного формования. В этой главе обобщен также опыт, накопленный в данной области специалистами ГДР.

Последующие главы посвящены вопросам каландрования (гл. 8), технологии производства изделий из стеклопластиков (гл. 9) и методам формования изделий из смол (олигомеров) (гл. 10). Впервые рассматриваются теоретические основы процесса производства изделий из стеклопластиков. Для советских специалистов будет весьма полезно знакомство с основными рекомендациями по проведению технологических процессов формования изделий из олигомеров.

Книга написана: Предисловие редактора, гл. 1 и разд. 5.1, 5.2 — д. т. н. проф. Н. И. Басовым; разд. 2.1, 2.3, 3.3, 4.2 — д. т. н. В. С. Кимом; разд. 2.4, 2.5, 5.3, 5.4.1 — д. т. н. Ю. В. Казанковым; разд. 2.6, 3.5, 4.1.1—4.1.8 — к. т. н. В. В. Скачковым; разд. 4.5 — к. т. н. В. К. Скуратовым; разд. 5.5 — к. т. н. В. А. Мироновым; разд. 5.4.2 — к. т. н. И. И. Фелипчуком; разд. 5.4.3 — к. т. н. В. А. Любартовичем; разд. 6.1—6.5 — к. т. н. К. А. Салазкиным; разд. 7.1, 7.3.1, 7.4—7.6 — к. т. н. М. А. Шерышевым; гл. 9 — к. т. н. М. С. Макаровым; разд. 2.2, 2.7 — д. т. н. В. Броем и доктором-инженером Х. Шифером; разд. 5.6, 5.7 — д. т. н. В. Броем и доктором-инженером Д. Каспаром; разд. 6.6, 6.7 — докторами-инженерами В. Бургхардтом и А. Шименцем; разд. 3.1, 3.2, 3.4, 7.2, 7.3.2—7.3.7 — доктором-инженером Х. Д. Фишером; разд. 4.1.9, 4.1.10, 4.3, 4.4 — доктором-инженером Ф. Эндлером; гл. 8 — доктором-химиком В. Шубертом; гл. 10 — доктором-инженером Х. Краузе.

Перевод рукописи немецких авторов на русский язык выполнен д. т. н. В. С. Кимом.

Классификация методов переработки полимерных материалов

Переработка пластических масс представляет собой совокупность различных процессов, с помощью которых исходный полимерный материал превращается в изделие с заранее заданными эксплуатационными свойствами. В настоящее время насчитывается несколько десятков разнообразных приемов и методов переработки пластмасс. Выбор метода переработки для изготовления изделия в каждом конкретном случае определяется такими факторами, как конструктивные особенности изделия и условия его эксплуатации, технологические свойства перерабатываемого материала, а также рядом экономических факторов (тиражность, стоимость и т. д.).

Большинство методов переработки пластических масс предусматривает формование изделий из полимеров, находящихся в вязкотекучем состоянии. Это — литье под давлением, экструзия, прессование, каландрование и др. Отдельные методы основаны на формовании материала в высокоэластическом состоянии — вакуумформование, пневмоформование. Находят промышленное использование методы формования из растворов и дисперсий полимеров, получение изделий методом полива, заливки и т. д.

В ряде случаев для изготовления одного изделия приходится сочетать несколько методов формования.

По назначению методы переработки пластмасс разделяются на подготовительные, основные и завершающие.

1.1. МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ СЫРЬЯ

Методы предварительной подготовки используются для улучшения технологических свойств перерабатываемого сырья, а также для получения полуфабрикатов и заготовок (листов, таблеток, гранул), применяемых в основных методах переработки. Среди подготовительных методов можно выделить смешение, вальцевание, таблетирование, сушку и предварительный подогрев, гранулирование.

Смешение — один из важнейших методов приготовления полимерных композиций, служащий для получения смеси из основного полимера и различных ингредиентов и существенно улучшающий свойства материала и изделий из него. При этом полученная смесь должна быть однородной по физическим и химическим свойствам и должна обладать равномерным распределением ингредиентов по всему объему смеси. Ввиду того,

что ингредиенты вводятся в основной полимер в агломерированном виде, процесс получения смеси (т. е. процесс смешения) сопровождается одновременным *диспергированием*, т. е. измельчением ингредиентов. На практике процесс смешения полимерных материалов проводится за счет силового воздействия на систему, однако в принципе возможно осуществление процесса смешения в результате молекулярной диффузии — при соизмеримости размеров частиц полимера и частиц вводимых ингредиентов и при малой вязкости полимерной среды.

В промышленности распространено смешение полимеров в жидкой фазе (когда основной полимер находится в жидком состоянии), смешение твердых сыпучих материалов и смешение вязких пластических масс. Для перемешивания в жидком состоянии используются пневматический, гидравлический и механический способы. При перемешивании сыпучих материалов кроме пневматического и механического методов применяют гравитационный метод. Для перемешивания вязких неньютоновских систем используют в основном только механический способ, обеспечивающий получение интенсивного смесительного воздействия. В смесительном оборудовании процесс перемешивания может происходить как непрерывно, так и периодически.

Вальцевание — процесс механической и тепловой обработки полимерных материалов с целью повышения их пластичности и однородности. Вальцевание осуществляется на валковых машинах (вальцах), оснащенных двумя параллельно расположенными, вращающимися навстречу друг другу полыми цилиндрами (валками). Процесс вальцевания заключается в многократном пропускании массы через зазор между валками, в результате чего на материал передается интенсивное силовое воздействие, сопровождающееся протеканием комплекса физических и химических процессов, приводящих к его разогреву, перемешиванию, гомогенизации. Вальцевание служит не только для получения однородной массы материала или перевода его в состояние, облегчающее дальнейшую переработку (подогрев, пластикация). Вальцевание может проводиться также с целью получения из полимеров листов или пленки, охлаждения материала, выходящего из смесителя, и придания ему формы, удобной для последующей переработки (введения наполнителей в связующее под давлением, дробления, размола и рафинирования сырья).

Таблетирование относится к числу процессов подготовки материала к его дальнейшей переработке методом прессования. Таблетирование осуществляется с целью получения из материала стабильных по массе прочных таблеток заданной формы. Применение таблетированного сырья (пресс-порошков, волоконитов) повышает точность дозировки, уменьшает потери сырья, сокращает время предварительного подогрева. Применение таблетированного сырья позволяет уменьшить размеры загрузочных камер пресс-форм, сокращает продолжительность цикла прессования, улучшает условия труда.

Процесс таблетирования состоит из следующих основных операций: подача материала в матрицу, сжатие его в холодном состоянии пуансоном, выталкивание таблетки из матрицы и сбрасывание таблетки в лоток.

Порошкообразные реактопласты таблетируют на таблеточных машинах, волокнистые — на гидравлических прессах или специально оборудованных таблеточных машинах.

Предварительное уплотнение порошков может производить ся не только в таблеточных машинах или прессах. Известны конструкции валкового и шнекового уплотнителей, при помощи которых увеличивают плотность перерабатываемых материалов и устраняют зависание порошков в бункерных устройствах перерабатывающего оборудования.

Сушка и предварительный подогрев порошков термопластов проводится с целью повышения их сыпучести и удаления из них излишней влаги и летучих веществ. Для сушки сырья используют сушильные камеры различного типа, сушильные устройства турбинного типа или ленточные сушилки непрерывного действия. На некоторых предприятиях для подсушки и предварительного подогрева сырья используют камерные сушилки, работающие по принципу пневматической эжекции. Часто подсушка и предварительный подогрев совмещаются с операциями подготовки сырья (введением пластикаторов и красителей) и с питанием машины; при этом сокращается время дальнейшего разогрева материала в перерабатывающем оборудовании и устраняется опасность поглощения частицами материалов влаги и летучих веществ.

Использование высушенного и предварительно подогретого полимерного сырья позволяет получать изделия с высокими физико-механическими показателями и хорошим качеством поверхности. При этом устраняется зависание материала в бункерных устройствах, приводящее к колебаниям производительности оборудования и массы готовых изделий, а также перерасходу сырья.

Предварительный подогрев реактопластов в таблетированном виде проводят непосредственно перед их загрузкой в пресс-форму с целью увеличения производительности процессов и улучшения качества изделий. Существует довольно много методов предварительного подогрева реактопластов; наибольшее распространение получил диэлектрический метод, или метод подогрева токами высокой частоты (ТВЧ). К достоинствам подогрева ТВЧ относятся высокая скорость и равномерность нагрева, простота регулирования нагрева, возможность механизации и автоматизации технологических процессов.

Гранулирование применяется для получения из расплава полимера гранулированного материала, наиболее удобного для переработки. Гранулят — это сыпучий материал, состоящий из однородных по размеру и форме частиц. Гранулы могут иметь форму цилиндра, шара, куба, прямоугольной пластинки. Опти-

мальный размер гранул зависит от вида материала и метода его переработки. Гранулированный материал с шарообразной формой частиц обладает максимальной плотностью, хорошей сыпучестью, минимальной удельной поверхностью, что снижает поглощение влаги и летучих из окружающей среды.

Гранулирование часто совмещают с процессами пластикации, стабилизации, окрашивания, наполнения пластмасс. Использование полимерного сырья в виде гранул стабилизирует режим работы перерабатывающего оборудования, улучшает условия труда, облегчает дозировку сырья, повышает производительность машин и качество готовых изделий.

1.2. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРОВ

Изготовление изделий из полимерных материалов осуществляется главным образом следующими методами: литье под давлением, экструзия, выдувное формование, прессование, каландрование, пневмо- и вакуумформование. Особую группу составляют методы получения изделий из стеклопластиков.

Термопласты претерпевают ряд превращений. Сначала материал плавится и в процессе пластической деформации ему придается конфигурация будущего изделия. Далее охлаждением до температуры теплостойкости фиксируется приданная ему форма. Процесс формообразования при переработке термореактивных материалов происходит при нагреве материала до температуры отверждения, сопровождающегося протеканием химической реакции и образованием в материале пространственной молекулярной структуры.

Литье под давлением — высокопроизводительный и автоматизированный метод переработки термопластов. Существующие в настоящее время технологические разновидности метода литья под давлением (включая вибролитьевое формование и интрузионное формование, литье вспениваемых материалов) отличаются способами и степенью нагрева материала, способами ввода его в форму и последующего формования. Однако, несмотря на большое разнообразие технологических схем метода литья под давлением, все они включают в себя следующие основные операции: подогрев материала (пластикация), впрыск (заполнение формы), выдержка под давлением и выдержка на охлаждение (отверждение).

Все эти операции осуществляются в литьевой машине — агрегате, обеспечивающем подготовку расплава к впрыску в литьевую форму, впрыск расплава под давлением в оформляющую полость, оформление и удаление готовой отливки из формы. Современное литьевое оборудование отличается универсальностью, быстроходностью, высокой производительностью, возможностью регулирования процесса по заданным параметрам и автоматического контроля за работой отдельных узлов машины. Создание унифицированных узлов смыкания форм и впрыска позволяет комплектовать ими оборудование в различ-

ных сочетаниях, исходя из потребностей литья конкретных изделий. К недостаткам метода следует отнести низкую производительность при изготовлении изделий сложной формы и с арматурой, а также высокую стоимость оснастки (литьевых форм).

Экструзия — процесс формования изделий продавливанием материала через формующий канал (профилирующий инструмент). Метод экструзии предназначен для получения изделий погонажного типа: труб, листов, пленок, профильных полос. Непрерывность и высокая производительность процесса экструзии создают предпосылки для автоматизации не только отдельных агрегатов, но и целых производств. В связи с этим экструдеры представляют собой один из наиболее перспективных видов оборудования для переработки пластмасс.

Агрегаты и линии на базе экструдеров, применяемые для изготовления изделий из термопластов, отличаются большим разнообразием конструкций. Они классифицируются по многим технологическим и конструктивным признакам, таким, например, как форма поперечного сечения изделия, способ формования, тип экструдера. Существуют агрегаты и линии производства гранул, плоских пленок, рукавных пленок, труб, открытых и закрытых профилей, кабельных покрытий. Сырьем для изготовления изделий методом экструзии служат поливинилхлорид и его сополимеры, полиолефины, полиакрилаты, полиамиды, поликарбонаты, полиформальдегид и др.

К числу недостатков метода можно отнести сложность управления процессами экструзии и высокую стоимость оборудования и формирующего инструмента.

Выдувное формование применяется для изготовления полых (объемных) изделий в виде бочек, бутылей, труб. Существует ряд разновидностей метода выдувного формования: выдавливание трубчатой заготовки из экструдера с последующим ее раздувом сжатым воздухом; получение заготовки методом литья под давлением и раздув заготовки в выдувной форме; раздельное изготовление трубчатой заготовки методом экструзии и отливка горловины изделия на литьевой машине с последующими соединением горловины с трубчатой заготовкой и раздувом последней; сварка трубчатой заготовки из листа с последующим нагреванием и раздувом.

Наибольшее распространение получил первый метод, включающий в себя следующие технологические операции: получение трубчатой заготовки, смыкание формы, раздув заготовки сжатым воздухом, охлаждение изделия, размыкание формы и извлечение изделия. Агрегаты для производства полых изделий создаются на базе серийно выпускаемых экструзионных машин и машин для литья под давлением. В состав агрегата помимо оборудования для получения заготовки входит приемное устройство. С целью увеличения производительности агрегата приемное устройство выполняется многокомпозиционным.

Основным сырьем для получения объемных полимерных изделий служат полиэтилен, полистирол, поливинилхлорид и другие термопластичные материалы.

Прессование является одним из наиболее распространенных методов переработки пластических масс. Этим методом в настоящее время перерабатываются в основном термореактивные материалы, так как переработка термопластов прессованием нерентабельна из-за низкой производительности и больших энергетических затрат.

Пресс-материал в виде порошка, гранул или таблеток загружают в пресс-форму и подвергают воздействию тепла и давления. Оформление и отверждение изделия происходит в горячей форме. В процессе формования давление должно достичь такого уровня, который обеспечил бы уплотнение материала, оформление изделия и удаление из формы воздуха и паров. Для изготовления изделий сложной формы и с применением арматуры служит метод литьевого прессования. Этот метод в отличие от метода прямого прессования позволяет изготавливать изделия без облоя, с тонкой арматурой, сложного сечения, с отверстиями, оформляемыми при помощи знаков и вставок.

Литьевое прессование позволяет частично компенсировать недостатки, свойственные методу прямого прессования (низкую производительность и большие отходы материала). При литьевом прессовании материал загружается в отдельную обогреваемую камеру (тигель), откуда продавливается в форму через литниковые каналы.

К разновидностям метода прессования относится и метод *поршневой экструзии* — непрерывное прессование изделий постоянного сечения путем продавливания через пресс-форму с открытым входным и выходным каналами.

Переработка пластмасс методом прессования осуществляется на высокопроизводительном прессовом оборудовании (прессах), работающем в полуавтоматическом и автоматическом режимах и обеспечивающем возможность изменения технологического режима прессования в широких пределах. Одним из средств комплексной автоматизации процесса прессования пластмасс служат роторные линии, отличительная особенность которых состоит в наличии нескольких синхронно вращающихся роторов. Каждый ротор представляет собой многопозиционную машину, предназначенную для осуществления какой-либо технологической или транспортной операции.

Каландрование, как и вальцевание, заключается в непрерывном продавливании полимерного материала через зазор между двумя вращающимися навстречу друг другу вальцами. Но в отличие от вальцевания, при каландровании материал пропускается через несколько зазоров с целью калибрования полученных рулонных материалов и пленок. Одна из схем процесса переработки материала на каландре такова: на двухвалковых вальцах из композиции термопласта получают непрерыв-

ную ленту, которую пропускают через экструдер; из экструдера с щелевой головкой материал поступает в каландр, где он проходит последовательно через несколько зазоров между обогреваемыми валками, при этом происходит образование пленки или листа заданной толщины.

В промышленности используется значительное число разновидностей каландров, предназначенных для выпуска профилированной ленты, промазки резиновой смесью тканей, обкладывания и дублирования, тиснения поверхности пленок и листов, обработки поверхности жестких материалов (глажения), удаления избыточной жидкой фазы. Методом каландрования перерабатываются термопластичные материалы и резиновые смеси.

Пневмо- и вакуумформование являются методами переработки листовых и пленочных термопластов. Наряду с этими методами для переработки материалов в виде листов и пленок используются механоформование (механическая вытяжка нагретой заготовки), штамповка (высечка) и различные комбинированные методы. При переработке термопластов методами пневмо- или вакуумформования происходит предварительный нагрев заготовки до высокоэластического состояния. После придания заготовке необходимой формы материал охлаждается. В зависимости от конструкции нагревательного устройства различают теплорадиационный и контактный обогрев.

В зависимости от характера расположения изделий в форме различают негативный, позитивный, свободный и комплексный способы формования листовых и пленочных термопластов.

Для придания изделию требуемой формы необходимо приложить к заготовке определенное давление. Создание давления при помощи вакуума (вакуумформование) используется для формования изделий из листов толщиной не более 5 мм. Формование при помощи сжатого воздуха (пневмоформование) применяется для получения изделий из толстых заготовок, а также для изготовления изделий с глубокой вытяжкой и сложной конфигурацией. Иногда для создания давления формования используется жидкость, нагнетаемая под давлением в полость над заготовкой.

(К недостаткам методов пневмо- и вакуумформования следует отнести большое количество отходов, разнотолщинной получаемых изделий и невысокую производительность.)

Методы изготовления изделий из стеклопластиков весьма разнообразны по аппаратурно-технологическому оформлению. Это обусловлено особенностями исходных материалов, формой и размерами изделий. В зависимости от вида исходных стекловолоконистых материалов существуют установки для формования изделий, армированных стекложгутом, лентой, тканью, стекломатом, рубленым стекловолокном. В качестве связующих используются полиэфирные, фенольные, кремнийорганические, эпоксидные смолы и компаунды.

Методы изготовления изделий из стеклопластиков подразде-

ляют на открытые и закрытые, с давлением и без давления, с предварительным совмещением связующего и наполнителя и последующим формованием или с одновременным осуществлением всех этих процессов.

В технологической практике используется несколько методов формования изделий из стеклопластиков: метод контактного формования, метод напыления, метод формования с помощью эластичной диафрагмы, метод прессования, намотки и др.

Технологический процесс изготовления изделий из стеклопластиков независимо от метода формования состоит из следующих операций: 1) подготовка связующего и наполнителя; 2) совмещение связующего и наполнителя; 3) формование изделий.

Оборудование для производства изделий из стеклопластиков разнообразно в конструктивном отношении, поскольку оно отражает специфику методов формования, вид армирующего наполнителя. Как правило, изделия из стеклопластиков формируются на специальном оборудовании, однако используются и стандартные гидравлические прессы и литьевые машины.

Метод контактного формования применяется для изготовления строительных конструкций, корпусов лодок, кузовов автомобилей, а также для футеровки химических аппаратов и емкостей. При контактном формовании стоимость изделий высока, так как цикл изготовления изделий длителен и значительны затраты ручного труда. Преимуществом метода является его универсальность, т. е. возможность получения изделий любой формы и размеров.

Метод напыления заключается в одновременном напылении на поверхность формы рубленого стекловолокна и связующего. Метод напыления можно с успехом комбинировать с другими методами формования изделий из стеклопластиков. Метод напыления более производителен, чем метод контактного формования, однако и он не лишен недостатков (значительные потери стекломатериалов, тяжелые условия труда, трудности изготовления изделий сложной формы).

Метод формования с помощью эластичной диафрагмы состоит в уплотнении поверхности формуемого изделия через эластичную диафрагму сжатым воздухом или под вакуумом. Этим методом можно получать изделия различного назначения, в том числе трубы и оболочки. По сравнению с методом контактного формования обеспечивается более высокое качество поверхности изделия и большая точность изготавливаемых деталей. К недостаткам метода следует отнести высокую стоимость применяемого оборудования и сложность технологического процесса.

Прессование позволяет избежать появления разнотолщинности и получать изделия с высоким качеством поверхности. Метод получил широкое распространение, так как он достаточно высокопроизводителен и осуществляется на серийно

выпускаемом оборудовании — гидропрессах. По технологическим признакам метод близок к методу прессования реактопластов. Специфика переработки стеклопластиков определяет некоторые модификации конструкций прессов, например введение системы регулирования скорости смыкания форм и т. д.

Пропитка под давлением в замкнутой форме позволяет получить изделия высокого качества без воздушных включений. Метод используется для формования различных корпусных изделий, емкостей, кузовов машин. Получаемые изделия стабильны по физико-механическим и диэлектрическим свойствам. Метод высокопроизводителен и выгоден для изготовления крупных и средних серий изделий.

Намотка — один из наиболее перспективных методов изготовления высокопрочных изделий из стеклопластиков. Метод позволяет получать изделия с заранее заданными свойствами путем создания ориентированной структуры. Метод намотки применим для изделий типа оболочек, имеющих форму тел вращения. Наибольшее распространение метод намотки получил при изготовлении аппаратов, емкостей и труб, элементов конструкций самолетов и ракет. Метод намотки в сочетании с методом прессования используется для формования изделий сложной формы. Особое место метод намотки занимает в производстве труб, так как позволяет полностью механизировать процесс и сделать его непрерывным.

Центробежное формование используется в основном для получения труб. Процесс заключается в пропитке предварительно уплотненного наполнителя связующим под действием центробежных сил. Трубы, полученные этим методом, отличаются высокой герметичностью, имеют гладкую внутреннюю поверхность. Этот метод применяется для футеровки пластмассовых и металлических труб. Достоинством метода является возможность оформления соединительных элементов (муфт, фитингов).

Протяжка применяется для получения труб и профильных изделий из стеклопластиков. Однонаправленное расположение волокна в изделиях, полученных данным методом, обуславливает их высокую механическую прочность. Метод высокопроизводителен, допускает механизацию.

1.3. ЗАВЕРШАЮЩИЕ МЕТОДЫ

Назначение этих методов — придание готовым изделиям определенного внешнего вида, создание неразъемного соединения отдельных элементов изделия. Важнейшими из этих методов являются механическая обработка изделий, сварка и склейка, нанесение декоративных покрытий.

Оборудование для переработки пластических масс характеризуется широкой номенклатурой по типам машин, что объясняется разнообразием способов формования и свойств полимер-

ных материалов. Физико-химические процессы, протекающие при переработке материалов, определяют основные требования к перерабатывающему оборудованию. Кроме основных видов оборудования в перерабатывающих производствах используется вспомогательное нетиповое оборудование для транспортировки, расфасовки, хранения и складирования.

Основное оборудование для переработки пластмасс можно разделить в соответствии с основными стадиями производства на оборудование для подготовки, собственно формования и обработки, отделки и сборки.

Основное требование, предъявляемое ко всем видам оборудования — обеспечение получения продукции отличного качества при высокой производительности. Повышение производительности достигается при использовании агрегатов большой единичной мощности, многопозиционного оборудования, внедрения прогрессивных технологических процессов. Целесообразно соединение в ряде случаев перерабатывающих производств с производствами получения полимера, предназначенного для переработки на данном оборудовании. Наряду с созданием агрегатов большой единичной мощности постоянной тенденцией является разработка широкой гаммы типоразмеров оборудования. Одним из основных направлений совершенствования процессов и оборудования для переработки пластмасс является внедрение систем автоматического управления технологическими процессами. Для использования этих систем необходимо увеличение надежности оборудования, применение правильно сконструированной оснастки, отработанных рациональных технологических режимов.

Решающее значение имеет внедрение прогрессивных, высокопроизводительных, принципиально новых методов переработки с использованием высокого давления, радиационного и вибрационного воздействия. Получают интенсивное использование манипуляторы (роботы), применяемые для управления литьевыми, вакуумформовочными, выдувными и другими агрегатами. Они производят закладку в форму арматуры, извлечение изделий из формы, отделение литника и другие операции. Использование манипуляторов позволяет повысить производительность труда, снизить себестоимость изделий.

ГЛАВА 2

Реология полимеров

В реологии полимеров ставится задача получить такие уравнения, которые описывали бы вязкоупругие и высокоэластические свойства расплавов и растворов полимеров и хорошо поддавались математическому решению. Реологические константы или функции должны быть определены экспериментально с вы-

сокой точностью при небольших материальных затратах. Для описания реологического поведения полимеров имеется множество реологических уравнений. Использование того или иного реологического уравнения определяется тем, какое течение должно быть описано, какое из свойств материалов является наиболее важным и какая точность описания требуется при этом. Например, приводимые в последующих разделах реологические уравнения для практических расчетов процессов и формирующих инструментов часто страдают тем недостатком, что отвечают так называемой одномерной модели, в которой не учитываются или недостаточно учитываются эластические свойства полимеров, или содержат множество экспериментально определяемых параметров, для определения которых требуются большие затраты труда и материальных средств [46].

Важнейшие требования, которые предъявляются к реологическим законам, заключаются в том, чтобы они описывали (воспроизводили) реальное поведение материалов (принцип объективности), а также напряженное состояние как при сдвиге, так и при растяжении. Они должны иметь такую форму, чтобы их можно было использовать для описания трехмерных (стационарных и нестационарных) процессов деформации при различной геометрии деформируемого тела. Наконец, должен быть обеспечен принцип инвариантности. Процессы, протекающие в материалах, должны быть независимы от выбранной системы координат. По принципу изотропности в реологических законах должны найти отражение свойства вещества [53].

Уравнение неразрывности является универсальным. Его использование для описания течения расплавов полимеров приводит к математическим уравнениям нелинейной вязкости. Подобные уравнения содержат множество материальных функций, которые зависят от инвариантов тензоров скоростей деформаций. При этом из характера функций нельзя делать определенных выводов. Указанные функции должны быть определены с учетом характера течения.

Структурные теории связывают макроскопические свойства полимеров, например реологические свойства, с микроскопическими параметрами, с физическими и химическими структурными параметрами, которые характеризуют вещества. Так как структурно-реологические свойства имеют непосредственное отношение к структурным характеристикам вещества, то они могут быть определены различными методами (не только путем реологических измерений) и в большинстве случаев независимо друг от друга.

2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Первоначально термин «реология» относился к текучим системам, но постепенно он стал использоваться шире. В настоящее время под реологией подразумевают область физики, изу-

чающую законы деформации тел под действием внешних сил. Деформация может быть определена как изменение расстояний между различными точками или частицами тела без нарушения его сплошности. Реальные тела дискретны, т. е. состоят из отдельных частиц, связанных между собой силами взаимодействия, поэтому нарушение сплошности дискретного тела можно определить как такое увеличение расстояний между большими группами частиц, при котором указанные силы взаимодействия уменьшаются и не могут уравновесить внешние силы. Таким образом, понятие «сплошность» или «непрерывность» по отношению к реальным телам условно. Представление о деформации как об изменении расстояний между частицами, также должно быть ограничено, так как смещения частиц дискретного тела относительно друг друга могут происходить и в результате теплового движения или диффузии, не связанных с деформацией. Таким образом, приведенное определение деформации может быть отнесено лишь к некоторому абстрактному сплошному телу (сплошной среде), вещество которого заполняет непрерывно занимаемую им область пространства.

Деформацию тела называют однородной, если координаты частиц деформированного тела (в неподвижной прямоугольной декартовой системе координат) связаны линейным уравнением с их исходными координатами, т. е.

$$x_i = \sum_{j=1}^3 (a_{ij}x_j + b_i) \quad (2.1)$$

где x_i — координата произвольной частицы деформируемого тела; x_j — координата той же частицы тела в недеформированном состоянии; a_{ij} , b_i — постоянные коэффициенты, не зависящие от x_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$).

Для количественного определения однородной деформации должны быть известны девять величин ε_{ij} , называемых компонентами тензора деформации, из них только шесть — независимые, так как $\varepsilon_{jh} = \varepsilon_{hj}$. Упорядоченный набор величин ε_{jh} представляет собой тензор деформации [1]. В частных случаях, когда на относительные перемещения частиц тела наложены жесткие условия, деформация может быть определена полностью одним числом. К таким случаям относятся следующие.

1. Изотропное расширение (сжатие). В этом случае относительное изменение расстояния между любыми двумя частицами в результате деформации одинаково. Наиболее распространенной мерой такой деформации служит относительная объемная деформация k_n , или k_v , определяемая соотношениями

$$k_n = \ln \frac{V}{V_0}; \quad k_v = \frac{V - V_0}{V_0} \quad (2.2)$$

где V_0 и V — объемы тела до и после деформации соответственно.

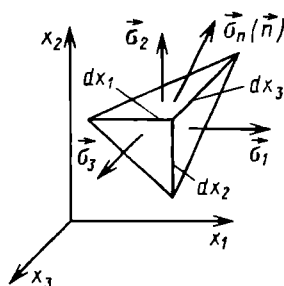
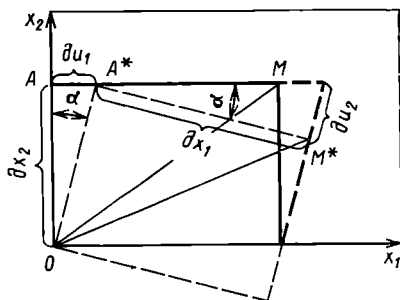


Рис. 2.1. Схема перемещения частиц при простом сдвиге.

Рис. 2.2. Схемы действия напряжений по граням элементарного тетраэдра.

2. Простой сдвиг. В этом случае перемещение всех точек тела параллельны друг другу и некоторой фиксированной плоскости, а величины перемещений прямо пропорциональны расстоянию от точек до указанной плоскости. При простом сдвиге (рис. 2.1) объем тела не изменяется.

В направлении сдвига происходит смещение на величину du_1 . Его градиент $\partial u_1 / \partial x_2$ определяется тангенсом угла α , который обозначим через γ , т. е.

$$\gamma = \operatorname{tg} \alpha = \partial u_1 / \partial x_2 \quad (2.3)$$

Поскольку при сдвиге изменяется длина линейных элементов, ориентированных до деформации в направлении оси x_2 , существует еще одна, неравная нулю, компонента смещения, а именно u_2 . Это видно по изменению длины отрезка OA , которая после деформации стала равна OA^* , так что

$$\frac{OA^* - OA}{OA} = \sec \alpha - 1 = \sqrt{1 + \gamma} - 1$$

В рассмотренном случае простого сдвига происходит не только изменение длин линейных элементов, но и поворот главных осей, что представляет собой вращение в окрестности данной точки элемента среды как целого.

Схема простого сдвига показана на рис. 2.1. Деформация состоит в смещении точки A в положение A^* (пусть величина α при этом мала). Как видно из рисунка, при простом сдвиге происходит поворот диагонали OM , которая после деформирования занимает новое положение OM^* . Отсюда следует, что простой сдвиг сопровождается вращением элемента среды. Величина поворота ω определяется углом α и равна

$$\omega = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} - \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) \quad (2.4)$$

3. Простое удлинение несжимаемого тела (материала, объем которого не изменяется при деформировании), характерное

для средней части длинных стержней при их растяжении силами, приложенными к концам.

При этом соотношение между изменением продольных и поперечных размеров определяют из условия постоянства объема рассматриваемой части тела. Поэтому деформация может быть полностью определена одной характеристикой, называемой относительным удлинением. Наиболее часто деформация при простом удлинении оценивается мерой Коши [1]

$$\epsilon_K = l - l_0/l_0 = \lambda - 1 \quad (2.5)$$

и мерой Генки

$$\epsilon_H = \ln \lambda \quad (2.6)$$

где l_0 и l — расстояния между двумя частицами деформируемого тела до и после деформирования; $\lambda = l/l_0$.

Применяют также меры Свейнгера $\epsilon_S = 1 - 1/\lambda$, Грина $\epsilon_G = 0,5(\lambda^2 - 1)$ и Алманси $\epsilon_A = 0,5(1 - 1/\lambda_2)$.

Для бесконечно малых деформаций все перечисленные меры эквивалентны.

Взаимодействие (механическое) какого-либо тела с окружающей его средой может быть представлено как действие на рассматриваемое тело внешних сил. Эти силы можно подразделить на объемные (массовые) и поверхностные. Объемные силы (например, силы тяжести, инерции) действуют непосредственно на каждую частицу тела. Поверхностные внешние силы непосредственно действуют только на частицы тела, находящиеся в местах контакта его с окружающими телами. Совокупность всех внешних тел представляет уравновешенную систему сил.

Выделим на поверхности рассматриваемого объема некоторую площадку Δs , характеризуемую направлением нормали к ней, определяемым единичным вектором $\vec{n}$ (рис. 2.2). Его считают положительным, если он направлен от выделенного объема. На площадке Δs действует сила $\Delta \vec{F}$. Величина $\sigma = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} (\Delta F / \Delta s)$ характеризует напряжение поверхностной силы в точке, принадлежащей указанной площадке Δs . Величина вектора $\vec{\sigma}$ зависит от положения данной точки в теле и от направления вектора $\vec{n}$. Поэтому для того, чтобы описать условия нагружения в точке, необходимо знать зависимость вектора $\vec{\sigma}$ от ориентации площадки и от положения точки в пространстве.

Векторы напряжения $\vec{\sigma}$ могут быть заданы своими проекциями на оси координат:

$$\sigma = \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} \vec{k}_j \quad (2.7)$$

где $\vec{k}$ — единичные векторы, направленные вдоль координатных осей x_j .

Таким образом, если известны девять величин σ_{ij} , то однородное напряженное состояние тела определено. Совокупность величин σ_{ij} составляет тензор напряжений, каждая из величин σ_{ij} называется компонентой этого тензора. В силу того, что $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$, из девяти величин σ_{ij} независимыми являются только шесть. В некоторых частных случаях напряженное состояние частицы может быть определено одним числом. К таким случаям относятся следующие:

1) изотропное растяжение (сжатие), когда $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33}$; $\sigma_{12} = \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0$;

2) одноосное растяжение (сжатие), когда все компоненты тензора напряжений, кроме одной из компонент σ_{ii} , равны нулю;

3) сдвиг, когда все компоненты тензора напряжений, кроме одной из пар $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ($i \neq j$), равны нулю.

Основной задачей реологии является установление количественной связи между деформациями и напряжениями, возникающими под действием внешних сил в различных точках деформируемого тела. Деформации, обусловленные другими причинами (например, термическими напряжениями) реология не рассматривает. Поскольку напряженное и деформированное состояния в различных точках тела определяются соответствующими тензорами, количественно связь между деформациями и напряжениями в общем виде может быть выражена функцией вида

$$f(\epsilon_{ij}; \sigma_{kl}) \quad (2.8)$$

где ϵ_{ij} , σ_{kl} — тензоры деформаций и напряжений.

Задача реологии сводится к определению для различных материалов (сред) вида реологического уравнения и его коэффициентов. Вид реологического уравнения и значения его модулей определяются свойствами материала, характеризующими его реакцию на возникающие в теле напряжения, и, наоборот, реологическое уравнение — это количественное выражение указанных свойств материала. Температура не является реологической переменной и может входить в функцию (2.8) как параметр, влияющий на величину коэффициентов этого уравнения, а также определять границы применимости того или иного закона деформации.

Рассмотрим два физических понятия, связанных с деформацией среды и в наиболее общей форме выражающих сущность того, что при этом происходит. В принципе можно представить себе два результата воздействия на материал, при котором внешние силы совершают некоторую работу. Во-первых, работа внешних сил может запасаться в среде, так что в единице объема среды накапливается упругая энергия, выражаемая упругим потенциалом W . Во-вторых, работа внешних сил может необратимо рассеиваться (диссипироваться), что определяется интенсивностью диссипации D в единице объема среды, проис-

ходящей в единицу времени. Введение величин W и D позволяет классифицировать различные среды следующим образом. Если при деформации $W \neq 0$, а $D = 0$, то такая среда называется упругой, при ее деформировании диссипация внешней работы отсутствует, поскольку вся работа запасается в материале в виде упругого потенциала. Если $W = 0$, а $D \neq 0$, то такая среда называется вязкой, при ее деформировании вся внешняя работа диссипируется. Наконец, если $W \neq 0$ и $D \neq 0$, то такая среда называется вязкоупругой, и при ее деформировании какая-то часть внешней работы диссипируется, а остальная запасается в материале в виде упругого потенциала.

После прекращения действия внешней силы упругая среда под действием запасенной в ней упругой энергии претерпевает изменения формы, которые можно назвать упругим восстановлением. После снятия нагрузки вязкая среда остается в том состоянии, в котором она была в момент снятия нагрузки, ибо не существует источников энергии, которые могли бы вызвать дальнейшую деформацию среды. Поэтому все деформации в вязкой среде — необратимые. После прекращения действия внешних сил в вязкоупругой среде происходит упругое восстановление и одновременно с этим диссипация накопленной в ней упругой энергии.

Если в процессе деформирования среды вся работа внешних сил диссипируется, так что $W = 0$, то это — процесс течения в чистом виде; после прекращения действия внешних сил вся совершенная деформация оказывается необратимой и достигнутое состояние будет равновесным.

Вязкие жидкости по кривым течения (графикам зависимости скоростей деформации от напряжения) классифицируются на ньютоновские и неньютоновские.

Вязкой ньютоновской жидкостью называют тело, скорость деформации которого пропорциональна приложенному напряжению. Реологическое уравнение (закон Ньютона) для простого сдвига имеет вид

$$\tau = \eta_n \dot{\gamma} \quad (2.9)$$

а для простого растяжения

$$\sigma = \eta_t \dot{\epsilon} \quad (2.10)$$

где $\dot{\gamma} = d\gamma/dt$ — скорость сдвига; η_n — коэффициент вязкости при сдвиге (вязкость ньютоновской жидкости); $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$ — скорость продольного течения; η_t — коэффициент вязкости Трутона (трутоновская вязкость); t — время.

Закон Ньютона удовлетворительно описывает поведение многих низкомолекулярных жидкостей при сдвиге и продольном течении. Уравнение (2.9) описывает зависимость от скорости сдвига только касательного напряжения τ . Поведение ньютоновской жидкости при деформации наглядно иллюстрирует

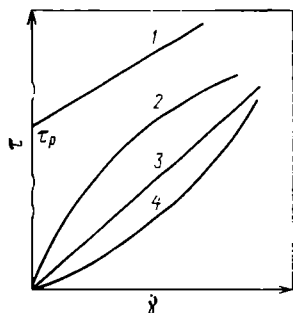


Рис. 2.3. Кривые течения реальных жидкостей: 1 — бингамовская жидкость; 2 — псевдопластичная жидкость; 3 — ньютоновская жидкость; 4 — дилатантная жидкость.

ся кривой течения. Кривая течения ньютоновской жидкости представляет собой в данном случае прямую линию, проходящую через начало координат, тангенс угла наклона прямой к оси $\dot{\gamma}$ пропорционален коэффициенту вязкости η_n (рис. 2.3).

Вязкопластичные среды (бингамовская среда). Кривая течения для этих материалов представляет прямую линию, пересекающую ось напряжения сдвига на расстоянии τ_r от ее начала (см. рис. 2.3). Напряжение текучести τ_r есть предел, превышение которого приводит к возникновению вязкого течения. Реологическое уравнение для бингамовских сред можно записать в виде:

$$\dot{\gamma} = f(\tau) = \tau - \tau_r \operatorname{sign} \tau, \text{ если } \tau > \tau_r \quad (2.11)$$

$$\dot{\gamma} = f(\tau) = \tau - \tau_r \operatorname{sign} \tau = 0, \text{ если } \tau \leq \tau_r$$

В уравнениях (2.11) η_p — пластическая вязкость, или коэффициент жесткости при сдвиге, численно равный тангенсу угла наклона кривой течения к оси $\dot{\gamma}$ (см. рис. 2.3).

Объяснение поведения бингамовских сред исходит из предположения о наличии у покоящейся жидкости пространственной структуры, достаточно жесткой, чтобы сопротивляться любому напряжению, не превосходящему по величине τ_r . Если напряжение превышает τ_r , то структура полностью разрушается и система ведет себя как обычная ньютоновская жидкость при напряжениях сдвига $\tau - \tau_r \operatorname{sign} \tau$. Когда же напряжение сдвига становится меньше τ_r , структура снова восстанавливается.

Аномально-вязкие (неньютоновские) жидкости. Жидкости, течение которых описывается однозначной нелинейной зависимостью между напряжением и скоростью деформации, называют неньютоновскими.

В этом разделе проводится классификация неньютоновских жидкостей и рассматриваются различные эмпирические и теоретические уравнения, связывающие неньютоновскую вязкость η со скоростью сдвига (или с напряжением сдвига) в случае простого изотермического сдвига.

Реальные жидкости с нелинейной кривой течения можно разбить на три обширные группы:

1) системы, для которых скорость сдвига в каждой точке представляет некоторую функцию только напряжения сдвига в этой точке;

2) системы, в которых связь между напряжением и скоростью сдвига зависит от времени действия напряжения или предыстории жидкости;

3) системы, обладающие свойствами как твердого тела, так и жидкости и частично проявляющие упругое восстановление формы после снятия напряжения (так называемые вязкоупругие жидкости).

Системы первого типа, свойства которых не зависят от времени воздействия напряжения, могут быть описаны реологическим уравнением

$$\tau = F(\dot{\gamma}); \quad \dot{\gamma} = f(\tau)$$

где F и f — произвольные возрастающие функции скорости деформации и напряжения соответственно.

Те жидкости, для которых η зависит только от мгновенного состояния сдвига, являются или псевдопластичными, или дилатантными. Однако ниже будет показано, что у псевдопластичных жидкостей η уменьшается с увеличением $\dot{\gamma}$ или τ , а у дилатантных жидкостей η увеличивается с увеличением $\dot{\gamma}$ или τ . Жидкости, с которыми имеют дело при переработке полимеров (преимущественно расплавы полимеров), обычно являются псевдопластичными.

Вторая группа жидкостей обладает временной зависимостью вязкости. Если временные эффекты обратимы, то жидкость является или тиксотропной, или реопектической. Если жидкость тиксотропна, то она при деформировании с постоянной скоростью сдвига достигает состояния стационарного течения в продолжение длительного периода времени, причем вязкость η будет уменьшаться со временем, достигая в конце концов равновесного значения (при $t \rightarrow \infty$), соответствующего предельному напряжению сдвига. Для реопектических жидкостей η увеличивается, достигая в конце концов равновесного значения.

Псевдопластичные жидкости не обнаруживают предела текучести; кривая течения их показывает, что отношение напряжения сдвига к скорости сдвига (кажущаяся вязкость η_k) постепенно понижается с ростом скорости сдвига:

$$\eta_k = \frac{\tau}{f(\tau)} = \frac{F(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} \quad (2.12)$$

Кривая течения становится линейной только при очень больших скоростях деформации сдвига.

Предельный наклон, получивший название вязкости при бесконечно большом сдвиге, обозначают η_∞ .

2.2. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Тензор напряжений сдвига вязких жидкостей в данной точке характеризуется относительным, свободным от вращения

движением частиц жидкости, описываемым тензором скоростей деформации.

Наиболее часто применяемым реологическим законом является степенное уравнение. Некоторые представляют его в виде

$$\tau = k\dot{\gamma}^n = k|\dot{\gamma}|^{n-1}|\dot{\gamma}| \quad (2.13)$$

Оствальд-де-Виле предлагает записать его в форме

$$\tau^m = c\dot{\gamma}$$

Эллис получил степенное уравнение

$$\dot{\gamma} = k_1\tau + k_2\tau^m$$

Известно также уравнение Рейнера в виде

$$\varphi_e = \varphi_0 + \sum_i (d_{2i}\tau^{2i}) \quad (2.14)$$

В приведенных уравнениях k , k_1 , k_2 , m , n , φ_0 — реологические константы материала.

Согласно степенному уравнению Оствальда-де-Виле, при $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ имеет место вязкость при бесконечном сдвиге, а при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ — вязкость при нулевом сдвиге. Поэтому указанное уравнение не применимо при очень малых и очень больших скоростях сдвига.

Применение сложных законов для качественного описания стационарных процессов требует после подстановки скоростей или напряжений сдвига интегрирования относительно системы координат. Это относится уже к проблемам вычислительной техники. Кроме того, с увеличением числа характеристических параметров уравнений повышается сложность их охвата с помощью измерительной техники.

Простое степенное уравнение, содержащее только два характеристических параметра, предложено Тадмором с соавторами [70] для описания зависимости вязкости от скоростей деформации и температуры в следующем виде:

$$\ln \eta = a_0 + a_1 \ln \dot{\gamma} + a_{11} (\ln \dot{\gamma})^2 + a_2 T + a_{22} T^2 + a_{12} T \ln \dot{\gamma} \quad (2.15)$$

где a_i — реологические константы; T — абсолютная температура.

2.2.1. Реологически «простые» жидкости

Реологически «простыми» жидкостями [47, 48] называют такие жидкости, реологические законы которых подчиняются «истории» деформирования.

Для несжимаемых жидкостей

$$\sigma = -pI + T^* \int_{s=0}^{s=\infty} E(t-s) \quad (2.16)$$

где p — гидростатическое давление; I — единичный тензор; T^* — изотропный симметричный тензор.

Преобразуя уравнение (2.16) в каноническую форму, получим:

$$\sigma = -pI + \eta b_1 - 0,5\beta_1 b_2 + \beta_2 (b_1^2 + 0,5b_2) \quad (2.17)$$

где $\beta_1 = [\sigma_1/(2\tau^2)] \eta^2$; $\sigma_1 = 2\xi_0^2 \dot{\gamma}^2$; $\beta_2 = [\sigma_2/(2\tau^2)] \eta^2$; $\sigma_2 = 2\varepsilon_0^2 \dot{\gamma}^2$;
 $b_1, b_2, \xi_0, \varepsilon_0$ — константы материала.

Как показано в работах [46, 50], такая запись правомочна, например для куэттовского течения, представляющего собой коаксиальное простое сдвиговое течение.

2.2.2. Реологические уравнения дифференциального типа

Реологическое уравнение дифференциального типа в общем случае записывается в форме [51]:

$$B\tau_{ij} = R e_{ij} \quad (2.18)$$

где B, R — дифференциальные операторы; τ_{ij} — тензор напряжения; e_{ij} — тензор скоростей деформации.

Для дифференциальных операторов в общем случае линейной модели рассматриваемого тела можно записать:

$$B = 1 + \lambda_0 \frac{\partial}{\partial t} + \lambda_1 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \dots + \lambda_n \frac{\partial^{n+1}}{\partial t^{n+1}}$$

$$R = 2\eta_0 \left(1 + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} + \mu_1 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \dots + \mu_m \frac{\partial^{m+1}}{\partial t^{m+1}} \right)$$

где λ_i, μ_i, η_0 — константы материала.

Для двухэлементной модели линейной вязкоэластичной жидкости (максвелловской жидкости) сложением составляющих деформации

$$d\gamma_\Sigma = d\gamma_\varepsilon + d\gamma_\nu$$

$$d\gamma_\varepsilon = d\tau/G; \quad d\gamma_\nu = (\tau/\eta_n) dt$$

(где G — модуль упругости при сдвиге; η_n — вязкость ньютоновской жидкости) получим следующее дифференциальное уравнение:

$$d\gamma_\Sigma = \frac{d\tau}{G} + \frac{\tau}{\eta_n} dt$$

или

$$\dot{\gamma}_\Sigma = \frac{d\tau}{dt} \frac{1}{G} + \frac{\tau}{\eta_n}$$

и

$$\frac{\tau}{\eta_n} + \frac{\dot{\tau}}{G} = \dot{\gamma}_\Sigma; \quad \tau + \frac{\eta_n}{G} \dot{\tau} = \eta_n \dot{\gamma}_\Sigma$$

Выражение $\eta_n/G = \lambda$ является временем релаксации максвелловской жидкости. Обзор реологических моделей дифференциального типа дан в работе [51].

2.2.3. Реологические уравнения интегрального типа

Согласно Лоджу [52], реологическое уравнение интегрального типа имеет вид

$$\tau = \int_{-\infty}^t m \left\{ t - t', I_2(t') \left[\left(1 + \frac{\xi}{2} \right) \cdot c^{-1}(x, t, t') + \frac{\xi}{2} c(x, t, t') \right] \right\} dt \quad (2.19)$$

где $c^{-1}(x, t, t')$ — тензор деформации Фингера; $c(x, t, t')$ — тензор деформации Коши; $[t - t', I_2(t')]$ — функция памяти; $I_2(t')$ — второй инвариант тензора деформации.

В литературе приведено множество интегральных уравнений, которые получены вариацией функций памяти и меры деформации [52].

Временные зависимости деформации полимеров хорошо описываются реологическими уравнениями интегрального типа.

Недостатками реологических уравнений дифференциального и интегрального типов являются низкая воспроизводимость вязкости при растяжении и относительно большое число часто трудно определяемых реологических констант материала.

2.2.4. Реологические уравнения, основанные на молекулярной теории

Эти уравнения описывают вязкое течение расплавов и растворов полимеров на основе молекулярной теории. Под воздействием внешних сил (сдвиговых) макромолекулы перемещаются обратимо и необратимо относительно друг друга. Основанием для таких перемещений служит распределение энергии между макромолекулами. Согласно [63], при этом имеют место следующие закономерности.

1. Макромолекулы полимера обладают относительно окружающих частиц потенциальной энергией u_i или u_k . Перемещение частиц в другое возможное положение осуществляется по закону Больцмана. Движение частиц обусловливается преодолением энергии межмолекулярной связи u_0 :

$$\Delta u_i = u_0 - u_i; \quad \Delta u_k = u_0 - u_k$$

2. Только определенная часть α всех частиц имеет возможность участвовать в перемещении.

3. Благодаря перемещению макромолекул происходит изменение потенциального поля вблизи движущихся частиц.

4. Внешнее сдвиговое напряжение вызывает деформацию участвующих в движении частиц.

5. Вероятность участия частиц в движении можно рассчитать по теории Больцмана. Вязкость η при этом рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau \exp [\Delta u / (RT)]}{(\alpha/2) v_0 \operatorname{sh} [A / (RT)]} \quad (2.20)$$

где Δu — энергия активации вязкого течения; R — газовая постоянная; v_0 — частота соударений; A — энергия деформации.

При $A = \tau a^3/2$

$$\eta = \frac{2\tau \exp [\Delta u / (RT)]}{\alpha v_0 \operatorname{sh} [\tau a^3 / (2RT)]}$$

Если $A \ll RT$, то вязкость не зависит от напряжения сдвига

$$\eta = \frac{2 \exp [\Delta u / (RT)]}{\alpha v_0 [a^3 / (2RT)]} \quad (2.21)$$

Температурная зависимость вязкости вытекает из уравнения (2.21):

$$\ln \eta = c_1 + c_2 \ln T + \Delta u / RT \quad (2.22)$$

Более корректное описание температурной зависимости вязкости получим при $\alpha = \Delta \alpha (T - T_c)$, где T — температура эксперимента (замеренная температура), а T_c — температура стеклования полимера. Тогда

$$\ln \eta = c_1 + \frac{\Delta u}{RT} - \ln \left(1 - \frac{T_c}{T} \right)$$

если $T > T_c$.

В работах [50, 52]¹ дается другая интерпретация температурной зависимости:

$$\alpha = 1 - \exp [\Delta \alpha (T - T_c)]$$

или

$$\alpha = \exp \left[- \frac{c_1}{c_0 + (T - T_c)} \right]$$

Имеется множество других реологических уравнений, основанных на молекулярной теории [64]:
уравнения Эйринга — Прандтля

$$\dot{\gamma} = (1/b) \operatorname{sh} (\alpha \tau); \quad \dot{\gamma} = c \operatorname{sh} (\tau/A)$$

$$\tau = acA \operatorname{sh} (\dot{\gamma}/c)$$

(где $c = 1/b$; $A = 1/a$); тогда вязкость равна

$$\eta = \frac{(1/\alpha) \operatorname{sh}^{-1} (\tau \dot{\gamma})}{\dot{\gamma}}$$

Таблица 2.1. Энергия активации ньютоновского вязкого течения некоторых полимеров

Полимер	Область температур, К	Энергия активации, кДж/моль
Полиэтилен высокой плотности	431—547	25,1—31,4
Полиэтилен низкой плотности	398—513	54,5—57,4
Поликарбонат	533—589	108,9—150,8
Полиизобутилен	223—433	46,1—59,5
Полипропилен	463—563	79,6—96,4
Полистирол	393—523	96,4—176
Политетрафторэтилен	613—638	104,8
Полivinилхлорид	453—483	103,5—119

уравнение Мюллера — Энгелтера

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{\beta\tau}{\text{sh}(\beta\tau)} = \frac{1}{1 + \frac{\beta^2\tau^2}{3!} + \frac{\beta^4\tau^4}{5!}}$$

Уравнение Бартенева

$$\eta = cM^n \exp[E/(RT) - \alpha'\tau]$$

В этих уравнениях α , α' , a , b , β — константы материала.

2.2.5. Вязкость полимерных смесей

Для описания вязкости однофазных смесей применимо уравнение Аррениуса [1]:

$$\ln \eta_c = N_1 \ln \eta_{k1} + N_2 \ln \eta_{k2} \quad (2.23)$$

где N_1 , N_2 — мольные доли компонентов смеси.

Смеси фракций полимеров, например смеси фракций полистирола в области начальной ньютоновской вязкости, могут быть описаны уравнением, с помощью которого рассчитывается вязкость смеси через массовые части и логарифмы вязкости компонентов [1]:

$$\lg \eta_c = M_1 \lg \eta_{k1} + M_2 \lg \eta_{k2} \quad (2.24)$$

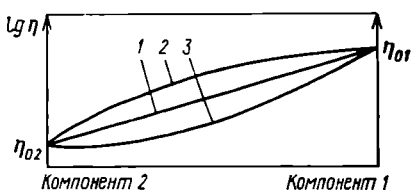
где η_c — вязкость полимерной смеси; η_{k1} , η_{k2} — вязкость компонентов смеси; M_1 , M_2 — массы компонентов смеси.

Уравнения (2.21) и (2.24) применимы, если энергия активации вязкого течения не изменяется под воздействием второго компонента смеси.

Если между компонентами наблюдается сильное взаимодействие, кривая вязкость — состав смеси располагается выше кривой, описываемой уравнением (2.24); при незначительном взаимодействии компонентов друг с другом упомянутая кривая располагается ниже кривой, полученной из уравнения (2.24). Это показано на рис. 2.4.

Рис. 2.4. Теоретическая (1) и экспериментальная (2, 3) зависимости вязкости полимерных смесей от их состава:

1 — по уравнению (2.24); 2 — при сильном взаимодействии компонентов смеси; 3 — при незначительном взаимодействии между исходными компонентами смеси (или при его отсутствии).



Распределение компонентов смеси оказывает влияние на характер кривой. Для однофазной смеси вязкость η описывается уравнением

$$\lg \eta = 0,5M_1^2 \ln \eta + 0,5M_2^2 \ln \eta_2 + M_1M_2 \ln \eta_{1,2} \quad (2.25)$$

где $\eta_{1,2}$ — вязкость смеси, состоящей из компонентов 1 и 2.

Зависимость вязкости от молекулярной массы описывается также уравнением Куна — Марка — Хувинка

$$\eta = k\bar{M}_w^\alpha \quad (2.26)$$

Здесь k и α — константы материала. Среднемассовая молекулярная масса смеси $\bar{M}_w$ равна

$$\bar{M}_w = \bar{M}_{w1}W_1 + \bar{M}_{w2}W_2 \quad (2.27)$$

где W_1, W_2 — массовые доли первого и второго компонентов смеси; $\bar{M}_{w1}, \bar{M}_{w2}$ — среднемассовые молекулярные массы первого и второго компонентов смеси.

Если рассматриваются реакции одного полимера, то в широкой области молекулярно-массового распределения $k_1 = k_2 = \alpha$ и $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, откуда следует, что ньютоновская вязкость смеси $\eta_{нс}$ равна

$$\eta_{нс} = (W_1\eta_{к1}^{1/\alpha} + W_2\eta_{к2}^{1/\alpha}) \quad (2.28)$$

Двухфазные смеси. Если компоненты полимерной смеси не растворимы друг в друге (или в основном компоненте — в матрице — диспергированы твердые частицы), то, предполагая, что плотность не меняется и, следовательно, коэффициенты Пуассона дисперсной фазы μ_1 и матрицы μ_m равны друг другу и составляют 0,5, получим:

$$\eta_c/\eta_m = G_c/G_m \quad (2.29)$$

где η_c и G_c — вязкость и модуль упругости смеси; η_m и G_m — вязкость и модуль упругости матрицы.

Если коэффициенты поперечного сжатия не равны друг другу, но модуль упругости дисперсной фазы намного больше модуля упругости матрицы, а дисперсная фаза состоит из частиц сферической формы, то

$$\frac{\eta_c}{\eta_m} - 1 = \frac{2,5(8 - 10\nu_m)}{15(1 - \nu_m)} \left(\frac{G_c}{G_m} - 1 \right) \quad (2.30)$$

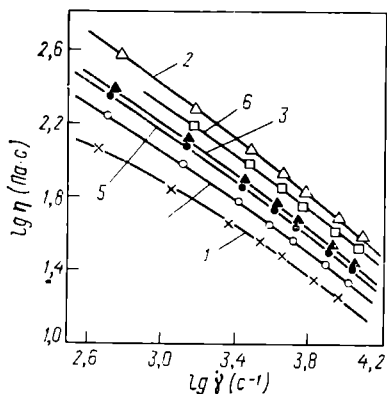


Рис. 2.5. Зависимость эффективной вязкости полиэтилена низкой плотности от скорости сдвига при различных типах наполнителей и их концентрациях (температура расплава 493 К):

1 — ненаполненный полиэтилен низкой плотности; 2 — карбонат кальция, 40% (об.); 3 — то же, 29% (об.); 4 — кварцевая мука, 25% (масс.); 5 — то же, 50% (масс.); 6 — то же, 66% (масс.)

Соотношение вязкостей смеси и матрицы получим в предположении, что размеры диспергированных частиц намного меньше, чем размер поперечного сечения потока и больше, чем размеры молекул матрицы:

$$\eta_c/\eta_m = 1 + k_p\phi \quad (2.31)$$

где k_p — коэффициент, характеризующий размеры диспергированных частиц (для частиц сферической формы $k_p=2,5$); ϕ — объемная доля диспергированной фазы.

Последнее уравнение применимо тогда, когда концентрация дисперсной фазы меньше 6%. При больших концентрациях дисперсной фазы предлагается использовать следующее уравнение:

$$\eta_c/\eta_m = 1 + 2,5\phi + 14\phi^2 +$$

Это уравнение описывает зависимость вязкости от объемной доли (до 30%) достаточно больших сферических частиц.

Авторы работы [1] для описания течения наполненных полимеров предлагают следующее реологическое уравнение:

$$\dot{\gamma} = A(e^{B\tau} - 1)$$

где $B = v/RT$; v — равновесный объем.

Если B не зависит от температуры, то имеет место температурная инвариантность кривых течения.

В общем случае с введением наполнителя в полимер наблюдается повышение вязкости. Оно зависит от типа наполнителя и уменьшается с увеличением вязкости. Зависимость вязкости наполненных и ненаполненных полиэтиленов низкой плотности от скорости сдвига показана на рис. 2.5. Как видно из рисунка, вязкость зависит от типа наполнителя и степени наполнения.

Длинноволокнистые наполнители обуславливают появление в расплаве ряда эффектов, оказывающих влияние на кривые течения, которые отличаются от кривых течения чистых полимеров или полимеров, наполненных порошкообразными веществами. Эти эффекты зависят от ориентации стекловолокон, образования характерных слоев, а также от специфического влияния волокнистых наполнителей на реологические свойства, причем исследования последних лет показали, что сопротивление

ния волокон наполнителя сравнимы с сопротивлением самих каналов капилляров.

В работе [24] показано большое различие в вязкостях чистых и наполненных полимеров в области низких скоростей сдвига, однако при высоких скоростях сдвига наблюдается сильное снижение вязкости волокнонаполненных полимеров.

2.2.6. Зависимость вязкости от температуры и давления

Изменение вязкости с изменением температуры может быть выражено температурным коэффициентом. В области ньютоновской вязкости этот коэффициент равен

$$\beta_0 = \frac{1}{\eta_0} \frac{\partial \eta_0}{\partial (1/T)}$$

В области неньютоновского течения

$$\beta_{\dot{\gamma}} = \frac{1}{\eta_e} \frac{\partial \eta_e}{\partial (1/T)}$$

В этих уравнениях β_0 , $\beta_{\dot{\gamma}}$ — температурные коэффициенты вязкости.

Для небольших областей температур температурный коэффициент вязкости можно принять постоянным. Теоретическое выражение температурной зависимости вязкости находят на основе двух различных представлений.

Согласно первому представлению [52], элементарные частицы жидкости (в случае полимеров — сегменты макромолекул) находятся в потенциальных «ямах», которые образуются благодаря переменным силам взаимодействия окружающей среды. Для того чтобы началось течение, необходима определенная энергетическая активация. В этом случае вязкость равна

$$\eta = \frac{\hbar L}{V} \exp\left(-\frac{S}{R}\right) \exp\left(\frac{E}{RT}\right),$$

где E — энергия активации вязкого течения; $\hbar$ — постоянная Планка; L — число Лошмидта; S — энтропия активации; V — объем моля (молярный объем).

Предполагая, что объем моля и энтропия активации незначительно зависят от температуры, последнее выражение можно привести к следующему виду:

$$\lg \eta = 0,4343 \frac{E}{R} \frac{1}{T} + \lg A$$

где A — константа материала, т. е. в логарифмических координатах зависимость вязкости от $1/T$ выражается прямой линией.

В другой форме вязкость равна

$$\eta = \eta_0 \exp [E/(RT)]$$

где η_0 — константа материала.

Требуемая линейность в полулогарифмических координатах для расплавов полимеров не выполняется, поскольку область температуры выбрана соответственно большей.

Температурная зависимость энергии активации описывается эмпирическим уравнением

$$E = B/T^a$$

где B и a — константы материала.

Энергия активации с увеличением температуры в общем случае уменьшается. Значения энергии активации для некоторых полимеров приведены в табл. 2.1 (в ньютоновском приближении). Для нелинейной области деформации необходимо рассматривать энергию активации при постоянной скорости сдвига $E_{\dot{\gamma}}$ при постоянном напряжении сдвига E_{τ} [1]. В этом случае $E_{\dot{\gamma}} \neq E_{\tau}$ и

$$\frac{E_{\tau}}{E_{\dot{\gamma}}} = \frac{(\partial \eta / \partial T)_{\tau}}{(\partial \eta / \partial T)_{\dot{\gamma}}} = 1 - \left(\frac{\partial \eta}{\partial \tau} \right)_{\tau} \dot{\gamma}$$

Согласно второму представлению о температурной зависимости вязкости [1], отношение свободного объема $V_f(T)$ к удельному $V_{уд}(T)$ считается переменным. При этом

$$\eta = A \exp \left[\frac{B}{V_f(T)/V_{уд}(T)} \right]$$

где константы A и B зависят от температур.

Для расплавов полимеров отношение свободного объема к удельному равно

$$\frac{V_f(T)}{V_{уд}(T)} \approx \frac{V_f(T_c)}{V_{уд}(T_c)} + \Delta \alpha (T - T_c)$$

где T_c — температура стеклования; $\Delta \alpha$ — разность коэффициентов теплового расширения при температурах T и T_c .

Из представления о свободном объеме можно вывести уравнение Вильямса — Ферри [52]:

$$\lg a_T = - \frac{a(T - T_c)}{b + (T - T_c)}$$

где a_T — отношение времен релаксации при температурах T и T_c , причем $T \geq T_c$.

Для описания функции вязкость — температура применяют исходную температуру $T_s \geq T_c$.

Следовательно

$$\lg a_T = \frac{c_1 (T - T_c)}{c_2 + (T - T_s)}$$

$$a_T = \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_s)} \frac{T_s \rho(T_s)}{T \rho(T)} \approx \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_s)}$$

«Универсальные» константы c_1 и c_2 (константы Вильямса — Ферри) равны: $c_1=17,4$; $c_2=51,6$.

Согласно [66], константы Вильямса — Ферри для некоторых полимеров составляют:

	c_1	c_2		c_1	c_2
Полистирол	13,6	50	Полиамид	16,8	53,6
Полиизобутилен	16,6	104,4	Поликарбонат	15	72
Полиметил-метакрилат	14,1	90,7			

Исходная температура T_s на 30—50 К выше, чем температура T_c .

Для аморфных полимеров была доказана применимость уравнения Вильямса — Ферри в области $T-T_s < 50$. При больших $T-T_s$ наблюдалось отклонение от расчетных значений.

Уравнение Вильямса — Ферри применимо для ньютоновской вязкости в области температур на 70—100 К выше T_c .

Зависимость вязкости от давления в ньютоновской области течения представляют через коэффициент давления при постоянной температуре:

$$\alpha_0 = \frac{1}{\eta} \left(\frac{\partial \eta}{\partial p} \right)_T \quad (2.32)$$

Для неньютоновских жидкостей следует различать изотермический коэффициент давления при постоянной скорости сдвига

$$\alpha_{\dot{\gamma}} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{\partial \tau}{\partial p} \right)_{\dot{\gamma}, T}$$

и изотермический коэффициент давления при постоянном напряжении сдвига

$$\alpha_{\tau} = - \frac{1}{\dot{\gamma}} \left(\frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial p} \right)_{\tau, T}$$

Для коэффициентов давления наблюдается следующая зависимость:

$$\frac{\alpha_{\tau}}{\alpha_{\dot{\gamma}}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \frac{d\dot{\gamma}}{d\tau}$$

Теоретические выражения зависимости вязкости от давления получены в работе [1]. Коэффициент давления α и объем V^* , необходимый для элементарного процесса течения, связаны соотношением

$$V^* = \alpha k T$$

Согласно [67], для полиолефинов при постоянной скорости сдвига коэффициент $\alpha_{\dot{\gamma}}$ в области давления от 0,1 Н/мм² до 200 Н/мм² от давления не зависит.

Авторы работы [1] установили, что при постоянном напряжении сдвига для полистирола коэффициент α_τ постоянен, а для полиэтилена зависит от давления.

Если коэффициент давления α_γ при постоянной температуре зависит от скорости сдвига, то

$$\frac{\partial \alpha_\gamma}{\partial \dot{\gamma}} < 0$$

т. е. при высоких скоростях сдвига влияние гидростатического давления на вязкость меньше, чем при низких скоростях сдвига. Кроме того, с повышением температуры и давления влияние давления меньше. Следовательно

$$\frac{\partial \alpha_\gamma}{\partial T} < 0; \quad \frac{\partial \alpha_\gamma}{\partial p} < 0$$

В работе [1] установлено, что зависимость коэффициента давления от скорости сдвига при различных значениях давления и температуры проходит через минимум.

Из уравнения (2.32) следует:

$$\int_{p_1}^{p_2} \alpha_0 dp = \int_{\eta_{01}}^{\eta_{02}} \frac{d\eta_0}{\eta_0}$$

$$\ln (\eta_{02}/\eta_{01}) = \alpha_0 (p_2 - p_1), \quad \text{или} \quad \eta_{02} = \eta_{01} \exp [\alpha_0 (p_2 - p_1)]$$

В области неньютоновского течения значение коэффициента давления при постоянной скорости сдвига определяется аналогично:

$$\alpha_\gamma = \frac{1}{\eta_\kappa} \left(\frac{\partial \eta_\kappa}{\partial p} \right)_{\dot{\gamma}T}$$

где η_κ — кажущаяся вязкость, т. е.

$$\eta_{\kappa 2} = \eta_{\kappa 1} \exp [\alpha_\gamma (p_2 - p_1)]$$

2.2.7. Зависимость вязкости от молекулярной массы

Ньютоновская вязкость растворов и расплавов линейных полимеров повышается пропорционально до определенной критической молекулярной массы полимеров M_c , выше которой вязкость увеличивается по экспоненте, причем для большинства полимеров значение экспоненты равно 3,4 (теоретическое значение — 3,5) (рис. 2.6):

$$\begin{aligned} M < M_c; & \quad \eta_0 = k_0 M \\ M > M_c; & \quad \eta_0 = k_0 M^{3,4} \end{aligned}$$

где k_0 — коэффициент пропорциональности.

Согласно другим данным

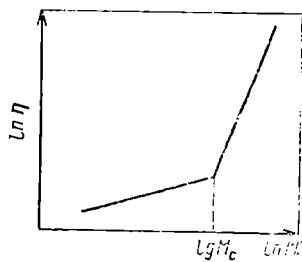
$$\begin{aligned} \eta_0 &= c_1 M + c_2 M^{3,4} \\ \eta_0 &= c_0 + c_1 M + c_2 M^3 + c_3 M^5 + \dots \end{aligned}$$

где c_0, c_1, c_2, c_3 — константы.

Рис. 2.6. Зависимость вязкости растворов и расплавов полимеров от молекулярной массы.

Для больших значений молекулярной массы (для полимеров) членом c_0 можно пренебречь. Тогда

$$\eta_0 = c_1 M + c_2 M^3 + c_3 M^5 + \dots$$



Согласно [55, 56], зависимость ньютоновской вязкости линейных полиэтиленов от молекулярной массы и температуры описывается уравнением

$$\lg \eta_0(T) = -15,71 + (1,39 \cdot 10^3/T) + 3,52 \lg \bar{M}_w$$

где $\bar{M}_w$ — среднемассовая молекулярная масса.

Молекулярная масса $\bar{M}_w$ определяется методами осмометрии или светорассеяния.

Для разветвленных полиэтиленов с индексом разветвленности g (для линейных полиэтиленов $g=1$) вязкость определяется соотношением

$$\lg \eta_0(T) = -30,19 + (2,55 \cdot 10^3/T) + 6,56 \lg (g \bar{M}_w)$$

Так как произведение $g \bar{M}_w$ пропорционально эффективному объему макромолекул, то при постоянном объеме макромолекул разветвленные полимеры имеют более высокие значения ньютоновской вязкости, чем линейные [55, 56].

При значениях молекулярной массы выше критической M_c проявляется неньютоновское поведение полимеров. Мерой структурной вязкости может служить отношение

$$\frac{\eta_{\tau=0}}{\eta_{\tau=\infty}} = \frac{k_N}{k_0} \bar{M}_w^2 = \left(\frac{M_w}{2M_c} \right)^2$$

В работе [51] показано, что влияние молекулярно-массового распределения на вязкость зависит от интенсивности сдвига. При сильном сдвиге увеличивается неньютоновская область и растет вязкость расплава с возрастанием $\bar{M}_w/\bar{M}_n$ (где $\bar{M}_n$ — среднечисловая молекулярная масса); при незначительном сдвиге вязкость расплава снижается.

С увеличением разветвленности макромолекул (числа ответвлений на одну макромолекулу) неньютоновский характер поведения изменяется незначительно.

Косвенной характеристикой молекулярной массы полимеров может служить показатель текучести расплава полимера. Так как с увеличением молекулярной массы вязкость повышается, а объемный расход через капилляр при прочих равных условиях уменьшается, то наблюдается обратно пропорциональная за-

висимость между молекулярной массой, вязкостью и показателем текучести полимера I :

$$\overline{M}_w \sim \eta = 1/I$$

Показатель текучести полимера определяется по стандартной методике.

2.2.8. Приборы для исследования реологических свойств

Для исследования реологических свойств расплавов полимеров при высоких скоростях сдвига преимущественно применяются капиллярные вискозиметры высокого давления с круглыми (капиллярными) или плоскощелевыми мундштуками. Для исследований реологических свойств в области низких скоростей сдвига (для расплавов полимеров $\gamma < 1$) применяются вискозиметры типа «конус — плоскость» или «плоскость — плоскость».

У ротационных вискозиметров негативное влияние на результаты исследования оказывают эффекты свободных поверхностей, инерционные силы при высоких скоростях сдвига и диссипативное тепловыделение. Преимущество капиллярных вискозиметров состоит в том, что значительная часть диссипативной энергии отводится конвективно, так что изотермические условия эксперимента могут быть обеспечены до очень больших значений скоростей сдвига.

Благодаря значительному влиянию давления на вязкость для расплавов полимеров зависимость вязкости от скорости сдвига в простейшем случае определяется с учетом как давления, так и диссипативной энергии.

Большое практическое значение имеет определение реологических свойств расплавов полимеров при растяжении. Это важно, например, при производстве пленок, получении полых изделий, химических волокон, наложении изоляции на кабели, когда имеют место большие скорости отвода изделий.

Наряду с получением вязкостных характеристик при растяжении непосредственно из реальных процессов (например, при

экструзии пленок и производстве полимерных нитей), согласно [62], для исследования свойств при растяжении имеет большое значение использование реометров.

На рис. 2.7 представлена зависимость вязкости полиэтиленов высокой и низкой

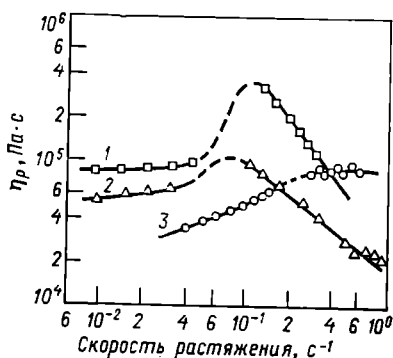


Рис. 2.7. Зависимость вязкости при растяжении от скорости растяжения: 1 — ПЭВП при 493 К; 2 — ПП при 453 К; 3 — ПЭНП при 453 К.

плотности (ПЭВП и ПЭНП) и полипропилена (ПП) от скорости растяжения. Данные получены путем измерения непосредственно при производстве пленок методом раздува и нитей из расплавов.

Последовательность измерения при исследовании реологических свойств при стационарных сдвиге или растяжении может быть использована также для исследования динамических свойств, а также при знакопеременных нагрузках.

Исследование реологических свойств при сдвиге. Для определения реологических свойств при стационарном сдвиге выбирается такое течение, при котором в направлении только одной оси координат компонента скорости не равна нулю.

При капиллярной вискозиметрии подводимая энергия расходуется на [23]: 1) вязкое течение в капилляре; 2) преодоление сопротивления на входе в капилляр и выходе из него; 3) высокоэластическую деформацию при входе расплава в капилляр.

Данных о временной зависимости кривых течения на капиллярных вискозиметрах получить нельзя [23].

При достаточно малых, постоянных во времени скоростях сдвига отношение напряжения сдвига к скорости является неизменным. Эту постоянную материала принимают за вязкость при нулевом сдвиге:

$$\eta_0 = \lim_{\substack{\dot{\gamma} \rightarrow 0 \\ \tau \rightarrow 0}} (\tau_{12} / \dot{\gamma})$$

Вязкость зависит от температуры, давления и молекулярной массы полимеров. Для измерения η_0 применяются ротационные вискозиметры, преимущественно типа «конус — плоскость» и «плоскость — плоскость».

При постоянной скорости сдвига $\dot{\gamma}_0$ для линейного вязкоэластичного материала при идеально жестком ротационном вискозиметре из начального участка кривых можно получить вязкость при растяжении:

$$\eta(t) = \tau_{12}(t) / \dot{\gamma}_0$$

$$N_1(\dot{\gamma}^2) = \sigma_{11} - \sigma_{22}$$

где $\dot{\gamma}_0 < \dot{\gamma}_0^*$ ($\dot{\gamma}_0^*$ — предельная скорость сдвига, до которой расплав полимера ведет себя как линейная вязкоэластичная жидкость).

При нелинейной вязкоэластической деформации наряду со сдвиговой вязкостью проявляется эффект нормальных напряжений:

$$N_1(\dot{\gamma}^2) = \sigma_{11} - \sigma_{22}$$

$$N_2(\dot{\gamma}^2) = \sigma_{22} - \sigma_{33}$$

где $N_1(\dot{\gamma}^2)$ и $N_2(\dot{\gamma}^2)$ — первая и вторая разности нормальных напряжений.

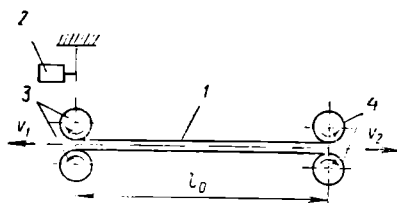


Рис. 2.8. Прибор для исследования реологических свойств полимеров при растяжении:

1 — образец; 2 — датчик замера усилия; 3, 4 — валки; v_1 , v_2 — окружающая скорость валков; l_0 — начальная длина образца.

Для расплавов полимеров $(\sigma_{22} - \sigma_{33}) < 0,1(\sigma_{11} - \sigma_{22})$. Для измерения первой разности нормальных напряжений в большинстве случаев применяются вискозиметры типа «конус — плоскость» или «плоскость — плоскость».

Определение реологических свойств при растяжении. В работе [62] описан реометр для исследования процесса растяжения, в котором образец полимера плавает в силиконовом масле в горизонтальном положении (рис. 2.8). Деформация осуществляется двумя зубчатыми колесами, вращающимися с постоянной скоростью. Принцип замера соответствует одноосному растяжению (простому удлинению). Такой способ измерения имеет преимущества, заключающиеся в том, что могут быть реализованы большие общие деформации и исключаются трудности, связанные с деформацией в местах зажима. Кроме того, привод с постоянной частотой вращения обеспечивает постоянную скорость растяжения $\dot{\epsilon}$ [61].

Деформация растяжения по Генки ϵ^H находится из соотношения

$$\epsilon^H = \ln(l/l_0) = \ln \lambda$$

где λ — мера деформации растяжения по Генки.

Деформация течения определяется как разность общей и эластической деформации. Эластическая деформация определяется из последующей усадки. Следовательно, общая деформация равна

$$\epsilon_{об} = \epsilon_э + \epsilon_т$$

где $\epsilon_э$ — эластическая деформация; $\epsilon_т$ — деформация течения.

При растяжении с постоянной скоростью $\dot{\epsilon}$ общая деформация $\epsilon_{об}$ определяется из диаграммы «напряжение — деформация».

Вязкость при растяжении определяют аналогично вязкости при сдвиге из уравнения

$$\eta_t(t) = \sigma(t)/\dot{\epsilon}_0$$

При небольших скоростях растяжения применимо трутоновское соотношение:

$$\eta_t(t) = 3\eta(t)$$

При больших деформациях растяжения расплавы полимеров упрочняются (появляется повышенное сопротивление растяжению); при высоких скоростях деформации сдвига наблюдается уменьшение вязкости, так что коэффициент в трутоновском соотношении становится >3 .

2.3. ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ ЧЕРЕЗ КАНАЛЫ ПРОСТОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Течение жидкости через плоскую неограниченную щель. При выводе основных расчетных уравнений предполагаем, что:

1) жидкость несжимаемая, с произвольной кривой течения $\dot{\gamma} = f(\tau)$ и смачивает стенки канала; 2) жидкость высоковязкая и массовыми силами можно пренебречь; 3) процесс изотермический; 4) влиянием боковых стенок канала можно пренебречь. Предполагаем также, что давление является функцией только координаты z , т. е. $p = p(z)$ и $dp/dz = \text{const}$.

Рассмотрим при этих условиях баланс сил, действующих на элемент жидкости единичной ширины, толщиной $2y$ и длиной dz (рис. 2.9).

Проектируя действующие силы на ось z

$$p \cdot 2y \cdot 1 - (p + dp) 2y \cdot 1 + 2\tau dz \cdot 1 = 0$$

получим:

$$\tau = \frac{dp}{dz} y \quad (2.33)$$

где p — давление жидкости; dp/dz — градиент давления в направлении оси z ; y — координата высоты канала; $\tau = \tau_{yz}$ — напряжение сдвига в плоскости, перпендикулярной оси y , в направлении оси z .

Из уравнения (2.33) следует, что в плоской неограниченной щели напряжение сдвига изменяется линейно по высоте канала (см. рис. 2.9).

Для жидкостей с произвольной кривой течения имеем следующее реологическое уравнение:

$$\dot{\gamma} = dv/dy = f(\tau) \quad (2.34)$$

где v — скорость жидкости в произвольной точке с координатой y .

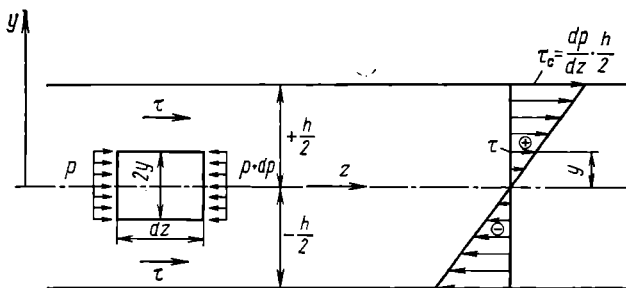


Рис. 2.9. Течение вязких жидкостей через плоскую щель.

Интегрируя уравнение (2.34), получим:

$$\int_0^v dv = \int_{h/2}^y f(\tau) dy \quad (2.35)$$

Для ньютоновской жидкости с реологическим уравнением

$$\dot{\gamma} = f(\tau) = \tau/\eta_n$$

имеем:

$$v = \frac{1}{\eta_n} \int_{h/2}^y \tau dy \quad (2.36)$$

С учетом уравнения (2.33) напряжения сдвига получим следующее выражение для скорости жидкости в плоской неограниченной щели:

$$v = \frac{1}{2\eta_n} \frac{dp}{dz} \left[y^2 - \left(\frac{h}{2} \right)^2 \right] \quad (2.37)$$

Для жидкости, подчиняющейся степенному закону вязкости

$$\dot{\gamma} = f(\tau) = a\tau^{k'} \quad (2.38)$$

где k' , a — реологические константы.

Совместным решением уравнений (2.38) и (2.35) с учетом выражения для напряжения сдвига (2.33) получим:

$$v = a \left(\frac{dp}{dz} \right)^{k'} \frac{1}{k'+1} \left[y^{k'+1} - \left(\frac{h}{2} \right)^{k'+1} \right] \quad (2.39)$$

Для бингамовских жидкостей

$$f(\tau) = (\tau - \tau_r \operatorname{sign} \tau) / \eta_p \quad \text{при } \tau > \tau_r \\ f(\tau) = 0 \quad \text{при } \tau \leq \tau_r$$

Из уравнения (2.35) получим:

$$v = \frac{1}{\eta_p} \frac{dp}{dz} \left[\frac{y^2}{2} - \left(\frac{h}{2} \right)^2 \right] - \frac{\tau_r \operatorname{sign} \tau}{\eta_p} \left(y - \frac{h}{2} \right) \quad (2.40)$$

Расход жидкости (производительность) через неограниченную плоскую щель находится интегрированием скорости по поперечному сечению рассматриваемого канала:

$$Q = 2B \int_0^{h/2} v dy = 2B \left[vy \Big|_0^{h/2} - \int_0^{h/2} y dv \right] \quad (2.41)$$

где B — ширина щели.

Первый член правой части уравнения (2.41) равен нулю, так как при $y = h/2$ значение $v = 0$ (из условия смачиваемости стенок).

Кроме того [см. (2.34)]

$$dv = f(\tau) dy \quad (2.42)$$

Для нахождения выражения дифференциала dy обратимся к рис. 2.9, на котором представлена эпюра напряжений сдвига. Из подобия треугольников на этом рисунке следует, что

$$y/(0.5h) = \tau/\tau_c$$

или

$$y = \frac{h}{2} \frac{\tau}{\tau_c} \quad (2.43)$$

где τ_c — напряжение сдвига на стенках канала.

Из последнего выражения получим:

$$dy = \frac{h}{2} \frac{d\tau}{\tau_c} \quad (2.44)$$

С учетом (2.42) и (2.44) уравнение (2.41) приводится к следующему виду:

$$Q = - \frac{Bh^2}{2\tau_c^2} \int_0^{\tau_c} \tau f(\tau) d\tau \quad (2.45)$$

Для ньютоновских жидкостей

$$Q = - \frac{B}{2} \frac{h^2}{\tau_c^2} \int_0^{\tau_c} \frac{\tau^2}{\eta_n} d\tau = - \frac{Bh^2}{6} \frac{\tau_c}{\eta_n} \quad (2.46)$$

С учетом того, что

$$\tau_c = \frac{dp}{dz} \frac{h}{2} \quad (2.47)$$

получим окончательно:

$$Q = - \frac{Bh^3}{12\eta_n} \frac{dp}{dz} \quad (2.48)$$

В случае течения через плоскую щель «степенной» жидкости $f(\tau) = a\tau^{k'}$, и из уравнения (2.45) следует:

$$Q = - \frac{Bah^{k'+2}}{(k'+2) 2^{k'+1}} \left(\frac{dp}{dz} \right)^{k'} \quad (2.49)$$

Для каналов постоянных размеров при стационарном течении можно принять, что

$$dp/dz = \Delta p/L$$

Тогда из уравнения (2.49) получим:

$$Q = - \frac{aBh^{k'+2}}{(k'+2) 2^{k'+1}} \frac{(\Delta p)^{k'}}{L^{k'}} \quad (2.50)$$

где Δp — перепад давления в плоской щели длиной L .

Для бингамовской жидкости, для которой $f(\tau) = \frac{\tau - \tau_r \text{sign} \tau}{\eta_p}$ при $\tau > \tau_r$ и $f(\tau) = 0$ при $\tau \leq \tau_r$, из уравнения (2.45) получим:

$$Q = -\frac{Bh^2}{2\tau_c^2} \left[\int_0^{\tau_r} \tau f(\tau) d\tau + \int_{\tau_r}^{\tau_c} \tau f(\tau) d\tau \right] \quad (2.51)$$

Первый член правой части равен нулю, так как $f(\tau) = 0$ при $\tau \leq \tau_r$. Поэтому

$$Q = -\frac{Bh^2}{12\eta_p} \frac{dp}{dz} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_r \text{sign} \tau}{\frac{dp}{dz} \cdot \frac{h}{2}} \right)^3 - \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_r \text{sign} \tau}{\frac{dp}{dz} \cdot \frac{h}{2}} \right) \right] \quad (2.52)$$

Течение жидкости через цилиндрические каналы. При общепринятых допущениях (изотермичность и ламинарность процесса, пренебрежение массовыми и инерционными силами, несжимаемость жидкости, смачиваемость стенки) из рассмотрения баланса сил, действующих на элемент жидкости толщиной dr и длиной dz (рис. 2.10), получим:

$$\rho \pi r^2 + 2\pi r \tau dz - (\rho + dp) \pi r^2 = 0$$

Отсюда

$$\tau = \frac{dp}{dz} \frac{r}{2} \quad (2.53)$$

где r — текущий радиус.

При $r=R$ из уравнения (2.53) получим выражение для напряжения сдвига на стенке канала:

$$\tau_c = \frac{dp}{dz} \frac{R}{2} \quad (2.54)$$

где R — радиус канала.

Графическая иллюстрация уравнения (2.54) представлена на рис. 2.10. Из этого рисунка следует, что

$$\tau/\tau_c = r/R \quad (2.55)$$

откуда

$$r = \frac{\tau}{\tau_c} R \quad (2.56)$$

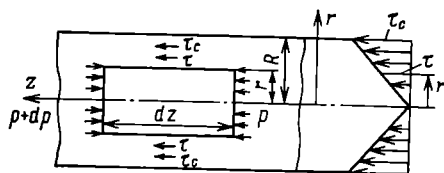
Для жидкостей с произвольной кривой течения справедливо реологическое уравнение

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = f(\tau) \quad (2.57)$$

интегрированием которого получим:

$$\int_0^v dv = \int_R^r f(\tau) dr \quad (2.58)$$

Рис. 2.10. Течение вязких жидкостей через цилиндрический канал.



Отсюда скорость потока ньютоновской жидкости в цилиндрическом канале равна

$$v_z = \int_R^r \frac{\tau}{\eta_n} dr \quad (2.59)$$

С учетом уравнения (2.53) получим:

$$v_z = \frac{1}{4\eta_n} \frac{dp}{dz} R^2 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2.60)$$

Отсюда следует, что распределение скорости при напорном течении ньютоновской жидкости в цилиндрическом канале является квадратичной функцией радиуса r .

Для «степенной» жидкости с учетом (2.53) из уравнения (2.58) следует:

$$v = \int_0^r a \tau^{k'} dr = \frac{R^{k'+1}}{a(k'+1)2k'} \left(\frac{dp}{dz} \right)^{k'} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{k'+1} \right] \quad (2.61)$$

Для бингамовской жидкости

$$v = \frac{\tau_t \text{sign } \tau}{\eta_p} (R - r) - \frac{1}{4\eta_p} \frac{dp}{dz} (R^2 - r^2) \quad (2.62)$$

Выражение для расхода жидкости через круглый канал находим путем интегрирования скорости потока по поперечному сечению канала:

$$Q = \pi \int_0^R v dr^2 = \pi \left[v r^2 \Big|_0^R - \int_0^R r^2 dv \right] \quad (2.63)$$

Первый член правой части уравнения (2.63) равен (из условия смачиваемости) нулю.

Из уравнения (2.57) получим, что

$$dv = f(\tau) dr \quad (2.64)$$

а dr находится дифференцированием уравнения (2.56):

$$dr = \frac{R}{\tau_c} d\tau \quad (2.65)$$

Тогда из уравнения (2.63) найдем:

$$Q = - \frac{\pi R^3}{\tau_c^3} \int_0^{\tau_c} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (2.66)$$

Для ньютоновской жидкости с учетом ее реологического уравнения из (2.66) следует:

$$Q = - \frac{\pi R^4}{8\eta_n} \frac{dp}{dz} \quad (2.67)$$

С учетом того, что в цилиндрическом канале постоянного размера $dp/dz = \Delta p/L$, уравнение расхода для ньютоновской жидкости примет вид (уравнение Пуазейля):

$$Q = - \frac{\pi R^4}{8\eta_n} \frac{\Delta p}{L} \quad (2.68)$$

где Δp — перепад давления на длине L цилиндрического канала.

Для жидкости, подчиняющейся степенному закону, из уравнения (2.66) получим:

$$Q = - \frac{\pi R^3}{\tau_c^3} \int_0^{\tau_c} \tau^2 a \tau^{k'} d\tau = - \frac{\pi a R^{k'+3}}{2^{k'}(k'+3)} \left(\frac{\Delta p}{L} \right)^{k'} \quad (2.69)$$

При $k'=1$ уравнение (2.69) превращается в уравнение Пуазейля (2.68), причем $a=1/\eta_n$.

Для бингамовской жидкости из уравнения (2.66) имеем:

$$Q = - \frac{\pi R^3}{\tau_c^3} \left[\int_0^{\tau_T} \tau^2 f(\tau) d\tau + \int_{\tau_T}^{\tau_c} \tau^2 f(\tau) d\tau \right] \quad (2.70)$$

Первый член правой части уравнения (2.70) равен нулю, так как при $\tau \leq \tau_T$ величина $\dot{\gamma} = f(\tau) = 0$.

С учетом этого из (2.70) получим:

$$Q = - \frac{\pi R^3}{4\eta_p} \tau_c \left[1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_T \operatorname{sign} \tau}{\tau_c} + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_T \operatorname{sign} \tau}{\tau_c} \right)^4 \right] \quad (2.71)$$

Расход бингамовской жидкости через круглую трубу можно выразить и через перепад давления, заменив для этого напряжение сдвига на стенке следующим его выражением:

$$\tau_c = \frac{\Delta p}{L} \frac{R}{2}$$

2.4. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕАКТОПЛАСТОВ И РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ

Вязкость реактопластов и резиновых смесей при температурах их переработки зависит не только от температуры и интенсивности деформирования, но и от времени вследствие протека-

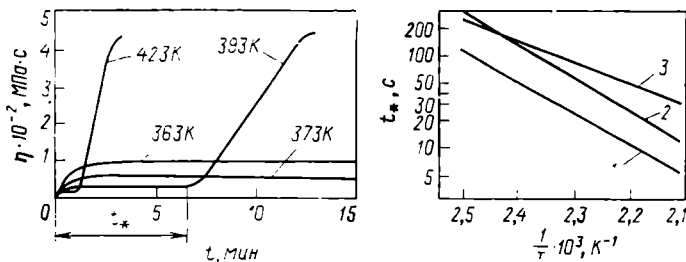


Рис. 2.11. Зависимость вязкости η реактопласта 03-010-02 от времени t при различных температурах (числа у кривых).

Рис. 2.12. Зависимость времени вязкотекучего состояния t_* от температуры: 1 — волокнит; 2 — реактопласт 03-010-02; 3 — реактопласт К-220-23.

ния реакции отверждения (вулканизации). Зависимость вязкости этих материалов от времени имеет на начальном участке плато [3], как это показано на рис. 2.11. За этим участком начинается интенсивный рост вязкости. В изотермическом режиме деформирования протяженность плато t_* (рис. 2.12) зависит от температуры T , согласно уравнению Аррениуса:

$$t_* = t_0 \exp \frac{U}{RT} \quad (2.72)$$

где U , t_0 — константы материала; R — универсальная газовая постоянная.

Величина U интерпретируется И. Ф. Канавцом как энергия активации реакции отверждения; ниже показано, что это вполне справедливо.

Аналогичные зависимости получены и для резиновых смесей [4]; при этом плато вязкости называется временем подвулканизации (реже — временем скорчинга).

Как протяженность плато, так и скорость последующего роста вязкости являются весьма важными характеристиками, определяющими соответственно максимально допустимое время, в течение которого материалу должна быть придана требуемая конфигурация, и время выдержки отформованного изделия в формующем инструменте для завершения реакции отверждения (вулканизации). Однако вследствие явного непостоянства температуры материала во всех процессах его переработки в изделия соотношение (2.72) не применимо для предсказания величины t_* в реальных условиях переработки. Необходимые для этого зависимости могут быть получены на основе следующих рассуждений.

Очевидно, что все свойства материала при прочих фиксированных параметрах (температуре T , давлении p , интенсивности деформирования γ) являются однозначной функцией степени протекания химической реакции s (степени отверждения для реактопластов и степени вулканизации для резиновых смесей), так как последняя определяет структуру материала в данный

момент времени. Таким образом, степень протекания реакции является одним из независимых параметров (наряду с T, p и $\dot{\gamma}$), определяющих комплекс свойств материалов, в частности их вязкость η .

В работе [5] определяется вид $\eta(c)$ для реактопластов. Предполагается, что вязкость связана с температурой уравнением Аррениуса не только в области плато, но во всем временном интервале ее изменения, а также что предшествующее температурно-временное воздействие оказывает влияние на вязкость в данный момент t , так как от этого воздействия зависит степень протекания реакции к моменту t . Из этого предположения вытекает, что формула (2.31) должна принять следующий вид:

$$\eta(T, c) = \eta_0(c) \exp \left[\frac{E(c)}{RT} \right] \quad (2.73)$$

т. е. коэффициенты формулы (2.31) должны быть функциями c .

Таким образом, для определения конкретного вида $\eta(c)$ необходимо, во-первых, знать вид $\eta_0(c)$ и $E(c)$ и, во-вторых, уметь определять c в каждый момент времени при протекании химической реакции в неизотермических условиях $T(t)$.

В работе [6] установлено, что кинетика реакции отверждения реактопластов на основе фенолоформальдегидной смолы подчиняется следующему уравнению:

$$\frac{dc}{dt} = k(T) (1 - c)^{n_p} \quad (2.74)$$

где

$$k(T) = k_0 \exp \left[\frac{-U}{RT(t)} \right]$$

Значение $n_p \approx 1,4$ для большинства композиций.

Работы [7–10] подтверждают применимость уравнения (2.74) для резиновых смесей, причем приводятся значения $0,8 < n_p < 2,4$. Однако большинство исследователей (например, [8, 9]) придерживается мнения, что для основной массы резиновых смесей характерен диапазон $1 < n_p < 1,6$, причем преобладает значение $n_p \approx 1,4$.

Интегрирование (2.74) приводит к искомому выражению для определения $c(t)$ в сложных температурно-временных режимах:

$$c(t) = 1 - \left\{ (1 - c_0)^{1-n_p} + k_0 (n_p - 1) \int_0^t \frac{dt}{\exp \left[\frac{U}{RT(t)} \right]} \right\}^{-\frac{1}{n_p-1}} \quad (2.75)$$

где c_0 — начальная степень протекания реакции при $t=0$.

Для реальных материалов c_0 может накапливаться уже в процессе их приготовления, например в процессе смешения на

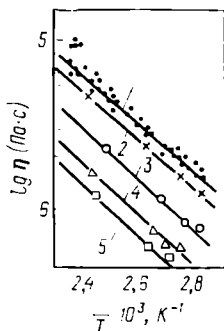


Рис. 2.13. Зависимость вязкости η реактопласта 03-010-02 от температуры T при различных степенях отверждения c : 1 — 0; 2 — 0,745; 3 — 0,890; 4 — 0,928; 5 — 0,938.

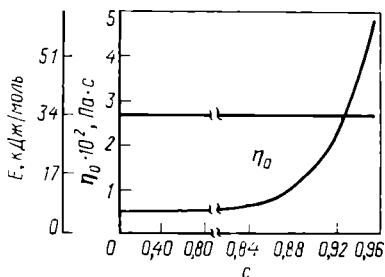


Рис. 2.14. Зависимость коэффициентов формулы (2.73) от степени отверждения c .

валяцах при приготовлении резиновых смесей и терморезактивных композиций.

Из опытных данных, приведенных на рис. 2.13 [5], видно, что функция $\eta(T)$ вполне удовлетворительно описывается формулой (2.73). Как видно из рис. 2.14, значение E практически не зависит от степени отверждения; предэкспоненциальный множитель $\eta_0(c)$ на первых стадиях протекания реакции также не зависит от c , однако после достижения значения $c=0,837$, соответствующего концу плато, наблюдается интенсивный рост вязкости.

Удовлетворительное объяснение этого, казалось бы, аномального явления заключается в особенностях механизма реакции, а также в особенностях сдвигового поведения реактопластов, являющихся высоконаполненными суспензиями. Во-первых, начальные стадии реакции протекают не в направлении общего роста молекулярной массы смолы, а в направлении сужения спектра молекулярно-массового распределения за счет увеличения молекулярной массы более подвижных низкомолекулярных фракций. Во-вторых, вязкость композиций в гораздо большей степени определяется сцеплением частиц наполнителя, образующих структуры типа каркасных, чем вязкостью связующего, поэтому, чтобы эффект роста вязкости композиции стал ощутим, необходимо существенное увеличение вязкости связующего, соответствующее достижению такого значения c , при котором реакция идет уже преимущественно в направлении образования сшитой структуры. Наконец, в-третьих, реакция протекает в микрогетерогенной среде и характеризуется существенной микрон неоднородностью степени протекания. Центрами наиболее высокой степени отверждения являются монокристаллы уротропина (отвердителя). Вязкость связующего начинает возрастать в первую очередь в этих микрообла-

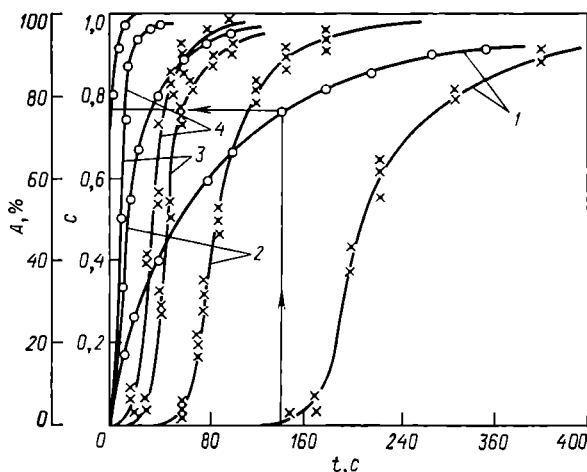


Рис. 2.15. Зависимость степени протекания реакции c (O) и соответствующего ей содержания нерастворимых веществ A (X) в реакционной смеси новолачная фенолоформальдегидная смола марки 18+уротропин от продолжительности протекания реакции t при температуре:
1 — 413 К; 2 — 433 К; 3 — 453 К; 4 — 473 К.

стях. Однако рост вязкости композиции становится заметным, видимо, тогда, когда размер этих областей оказывается соизмеримым с характерным размером частиц наполнителя.

Подтверждением правильности приведенного объяснения является значительное отставание роста содержания нерастворимого продукта (со сшитой структурой) от степени отверждения (рис. 2.15). Более того, установлено [11], что начало роста содержания нерастворимого продукта соответствует значениям степени протекания реакции от 0,78 до 0,88. Именно в этом диапазоне лежит значение $c_*=0,837$, соответствующее началу интенсивного роста вязкости материала. Величина c определялась по массе выделившегося продукта реакции (аммиака).

Для резиновых смесей представление функции $\eta(T, c)$ в виде (2.73) также правомерно. И здесь E практически не зависит от c . Однако следует отметить значительные различия в виде функции $\eta_0(c)$ для реактопластов и резиновых смесей.

В работах Б. А. Догадкина и сотр. [12; 13, с. 21—46] отмечается, что рост вязкости практически всех ненаполненных резиновых смесей начинается в момент присоединения 0,4—0,5% серы, а наполненных — 0,25—0,3%, что соответствует степени протекания реакции при «насыщающем» содержании серы, равной около 1—1,5%, в то время как для новолачных фенолоформальдегидных реактопластов она равна примерно 85%. Это понятно, если учесть, что молекулярная масса каучуков примерно в 100—400 раз выше средней молекулярной массы смолы и для начала потери текучести каучука требуется реализовать примерно в столько же раз меньшее число элементарных актов

сшивания. Таким образом, учитывая, что большинство резиновых смесей содержит не более 2—3% серы (т. е. примерно в 10 раз меньше ее «насыщающего» содержания), можно считать, что значение c_* для них составляет примерно 0,1. В связи с этим функция $\eta_0(c)$ в области ее роста для этих смесей оказывается более пологой, чем для реактопластов, что, в частности, отражает гораздо более медленное, чем у реактопластов, возрастание вязкости в процессе вулканизации.

Зависимость (2.73) в сочетании с формулой (2.75) дает широкую информацию о поведении термореактивных композиций в процессах их переработки. Однако в производственных условиях определение констант химической кинетики c_0 , n_p , k_0 , а также функции $\eta_0(c)$ представляет собой известные трудности.

В инженерной практике в большинстве случаев как при выборе рационального сочетания конструктивных параметров проектируемого оборудования, так и при подборе оптимальных технологических параметров процессов переработки (например, при литье под давлением — максимально допустимого времени заполнения литьевой формы) оказывается достаточным знание только протяженности плато вязкости t_* в конкретных сложных температурно-временных режимах переработки материала.

Поскольку t_* в соответствии с установленным видом функции $\eta_0(c)$ однозначно связано с вполне определенной степенью отверждения (вулканизации) c_{*i} , то для определения t_* возможно использование формулы (2.75), которую для этого представим следующим образом:

$$\frac{1}{(1-n_p)k_0} \left[(1-c_0)^{1-n_p} - (1-c_*)^{1-n_p} \right] = I_* \quad (2.76)$$

где

$$I_* = \int_0^{t_*} \exp \left[\frac{-U}{RT(t)} \right] dt \quad (2.77)$$

Поскольку в левую часть равенства (2.76) входят величины, постоянные для данной композиции, то очевидно, что правая часть его, содержащая t_* и обозначенная I_* , не зависит от вида функции $T(t)$, т. е. должна иметь для данной композиции постоянное значение при любом режиме $T(t)$. Более того, величина I при произвольных значениях времени t , так же как и c , однозначно определяет степень протекания реакции, так как для данного материала однозначно связана выражением (2.76) с величиной c . С этой точки зрения I может быть независимым параметром состояния, полностью эквивалентным c . Справедливость этого положения для реактопластов доказана экспериментально [5]. В работе [14] величина I используется для представления зависимости вязкости термореактивной композиции 03-010-02 от степени ее отверждения, причем показано, что вид функции $\eta(I)$ не зависит от температурно-временного и деформационного режимов проведения реакции отверждения.

Для резиновых смесей экспериментальное доказательство постоянства значения I_* для данного материала в любом режиме $T(t)$ приведено в работах [15, 16].

Таким образом, выражение (2.77) является критерием оценки протяженности плато вязкости в любом температурно-временном режиме проведения реакции отверждения (вулканизации), описываемой кинетическим уравнением вида (2.74). Для определения t_* по этому критерию достаточно знать I_* и U , которые могут быть вычислены из данных двух вискозиметрических опытов в изотермическом режиме при различных T_1 и T_2 по следующим формулам, вытекающим из (2.77) при условии $T = \text{const}$

$$U = R \frac{\ln(t_{*1}/t_{*2})}{(1/T_1) - (1/T_2)}; \quad I_* = t_{*1} \exp\left(\frac{-U}{RT_1}\right) \quad (2.78)$$

✓ 2.5. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Многие полимерные композиции, в частности реактопласты и резиновые смеси, содержат значительные количества наполнителей (до 100% по отношению к полимерной основе и более). Присутствие таких количеств наполнителей оказывает существенное влияние на вязкость материалов.

Из формул (2.31) и (2.73) вытекает, что функция $\eta(c, T, \dot{\gamma})$ может быть представлена следующим образом:

$$\eta(c, T, \dot{\gamma}) = \eta_0(0) \cdot f_1(c) \cdot f_2(T) \cdot f_3(\dot{\gamma})$$

$$f_1(c) = \frac{\eta_0(c)}{\eta_0(0)}; \quad f_2(T) = \exp\left(\frac{E}{RT}\right); \quad f_3(\dot{\gamma}) = \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0}\right)^{n-1} \quad (2.79)$$

где $\eta_0(0)$ — коэффициент, имеющий физический смысл вязкости при $c=0$, $T \rightarrow \infty$, $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$.

Экспериментально показано [17, с. 52—60], что зависимость вязкости от степени наполненности резиновой смеси может быть учтена введением в выражение (2.79) (записанное для каучука — основы данной смеси) множителя в виде функции $f_4(\varphi)$, где φ — объемное содержание наполнителя [при $\varphi=0$ функция $f_4(\varphi)=1$]. Для неактивных наполнителей выражение $f_4(\varphi)$ может быть представлено формулой [17], полученной Эйнштейном для вязкости суспензий:

$$f_4(\varphi) = 1 + \alpha\varphi; \quad \alpha = 5/2 \quad (2.80)$$

Считается, что для низковязких резиновых смесей при течении их в каналах перерабатывающего оборудования и испытательных приборов не характерны сколько-нибудь заметные скорости пристенного скольжения [18]. В отличие от резиновых смесей течение реактопластов в каналах при больших скоро-

стях сопровождается интенсивным пристенным скольжением. Причины столь различного поведения этих материалов заключаются в следующем.

Физико-химическое состояние расплавов реактопластов, в частности композиции на основе фенолоформальдегидной смолы 03-010-82, рассматриваемой в дальнейшем в качестве характерного примера, качественно отличается от состояния резиновой смеси. Связующее композиции (например, фенолоформальдегидная смола) представляет собой низкомолекулярный продукт (разброс молекулярных масс промышленного продукта составляет от 400 до 1200) с вязкостью при температурах переработки, в тысячи раз меньшей, чем вязкость резиновых смесей и самой термореактивной композиции. Высокая вязкость термореактивной композиции 03-010-02 обеспечивается в основном большим содержанием наполнителя — древесной муки, имеющей волокнистую структуру при значительных размерах частиц. Вязкость этой системы, представляющей собой высоконаполненную суспензию, определяется характером взаимодействия частиц наполнителя со связующим, поэтому при деформировании такой системе присущи аномальные явления, обусловленные разрушением «каркаса», состоящего из соединенных друг с другом частиц наполнителя [19].

На рис. 2.16 приведен вид функции $\eta(\dot{\gamma})$ для реактопласта [20], определенной методом капиллярной вискозиметрии в об-

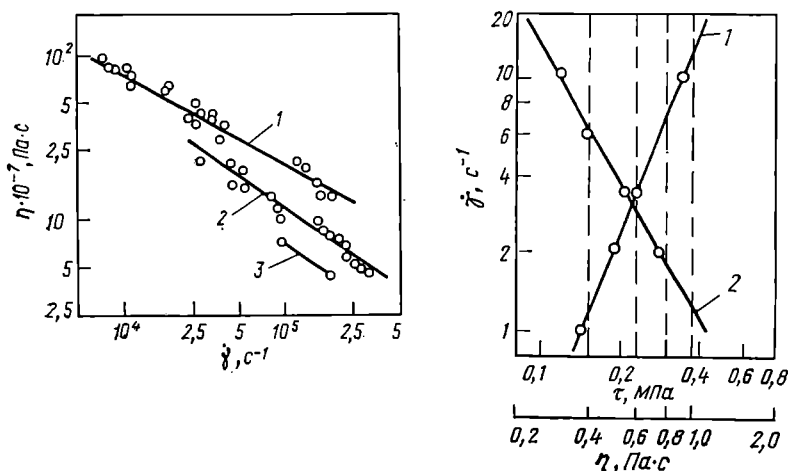


Рис. 2.16. Зависимость η термореактивной композиции на основе фенолоформальдегидной смолы с древесным наполнителем от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ при различных диаметрах капилляров:
1 — $2 \cdot 10^{-3}$; 2 — 10^{-3} м; 3 — $5 \cdot 10^{-4}$ м.

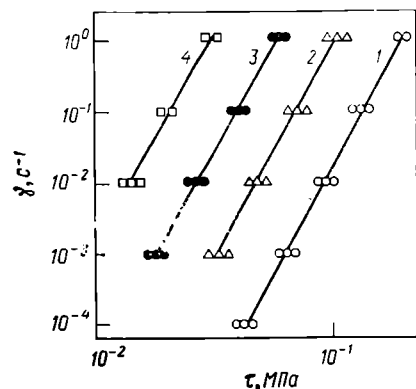
Рис. 2.17. Кривая течения термореактивной композиции 31/1649 (ГДР) (кривая 1) и соответствующая ей зависимость $\eta(\dot{\gamma})$ (кривая 2) при 393 К.

ласти больших расходов, которым соответствует область $\dot{\gamma} > 10^4 \text{ с}^{-1}$. Неидентичность функции $\eta(\dot{\gamma})$ при различных диаметрах капилляров может быть обусловлена прежде всего наличием значительного пристенного скольжения. В работе [21] также методом капиллярной вискозиметрии получены кривые течения (рис. 2.17) для композиции 31/1649 (ГДР), практически аналогичной по рецептуре той композиции, для которой приведены данные на рис. 2.16. Как видно из рис. 2.17, «расслоения» кривых для различных капилляров в области малых скоростей сдвига ($\dot{\gamma} < 10 \text{ с}^{-1}$) не наблюдается.

Детальный анализ возникновения и развития пристенного скольжения, а также сопутствующих ему структурных изменений в массе деформируемого материала дан в работе [22], которая выполнялась на вискозиметрах трех типов. Нижний диапазон скоростей сдвига (от 10^{-3} до 10^0 с^{-1}) изучался в экспериментах на ротационном вискозиметре «конус — плоскость», верхний предел диапазона скоростей сдвига в этом случае был ограничен отсутствием жесткого термостатирования. В приборе использованы рифленые рабочие органы, исключающие явление пристенного скольжения.

Область скоростей сдвига от 10^1 до 10^2 с^{-1} исследовалась в опытах на ротационном вискозиметре «цилиндр — цилиндр», имеющем в отличие от предыдущего вискозиметра жесткое жидкостное термостатирование рабочих органов. Опыты на этом приборе проводились на рифленом комплекте цилиндров. Верхний предел скорости сдвига в данном случае был ограничен как возможностями привода, так и диссипативными тепловыделениями, снижающими точность температурного контроля деформируемого материала. Область скоростей сдвига от 10^2 до 10^4 с^{-1} изучалась методом капиллярной вискозиметрии.

Кривые течения, полученные на вискозиметре «конус — плоскость», приведены на рис. 2.18. Как видно, в области $\dot{\gamma} < 1 \text{ с}^{-1}$ зависимость вязкости



от температуры и скорости сдвига удовлетворительно описывается функциями $f_2(T)$ и $f_3(\dot{\gamma})$, вид которых определен выражениями (2.79) со следующими значениями входящих

Рис. 2.18. Кривые течения материала 03-010-02 (не содержащего отверждающего агента — уротропина) в области плато вязкости, полученные на вискозиметре «конус — плоскость» при температурах:

1 — 368 К; 2 — 393; 3 — 413; 4 — 433 К.

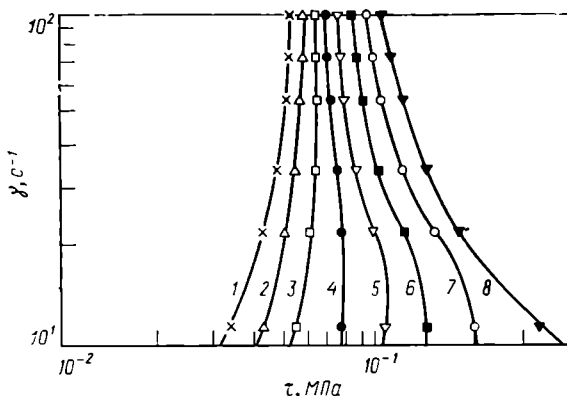


Рис. 2.19. Кривые течения материала 03-010-02 в области плато вязкости, полученные на вискозиметре «цилиндр — цилиндр» при температурах: 1 — 453 К; 2 — 443; 3 — 433; 4 — 423; 5 — 413; 6 — 403; 7 — 393; 8 — 383 К.

в них констант: $n=0,154$; $\eta_0(0)=11,2 \times 10^{-1} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $E=35,5 \text{ кДж/моль}$. Опыты на этом приборе в режиме релаксации напряжений при остановленном подвижном конусе после деформирования при различных $\dot{\gamma}$ и T показали, что четко выраженные предельные напряжения сдвига бингамовского типа, значения которых могли бы быть достоверно измерены, практически отсутствуют.

Кривые течения, полученные на вискозиметре «цилиндр — цилиндр», показаны на рис. 2.19. При высоких температурах (443—453 К) вид кривых течения подобен показанным на рис. 2.18. Однако с уменьшением температуры (с ростом напряжения сдвига τ) наблюдается трансформация вида кривых, которые, принимая сначала S-образную форму, приобретают затем форму, отвечающую явлению «сверханомалии» вязкости (уменьшение τ с ростом $\dot{\gamma}$). Для выяснения причины такой трансформации вида кривых был проведен сравнительный микроанализ структуры материала образцов, соответствующих кривым 1, 2 и кривым 6—8 при $\dot{\gamma} \approx 20 \text{ с}^{-1}$. Процесс деформирования прекращался при одновременном резком охлаждении образцов. Последние вынимались из рабочего органа вискозиметра без разрушения. Выполнялись тонкие кольцевые срезы образцов, анализ которых показал, что при деформировании в аномальной области кривой течения структура материала однородна. В случае деформирования в сверханомальной области у образцов наблюдалась весьма узкая (в 7—10 раз более тонкая, чем толщина образцов, составлявшая 2 мм) кольцевая область, материал которой был сильно обеднен наполнителем (древесной мукой) в сравнении с основной массой материала образца.

Таким образом, было установлено, что по мере роста интенсивности деформирования в массе образца происходит полный разрыв «каркаса», построенного из наполнителя, и образуется узкий слой, заполненный смолой, вязкость которой в тысячи раз меньше вязкости основной структуры материала. Образование этого слоя выглядит как нарушение сплошности образца, как «внутренний срыв», когда две как бы независимые части образца движутся друг относительно друга с различными линейными скоростями, что внешне очень похоже на пристенное скольжение.

Как видно из кривых течения, процесс образования внутреннего срыва не является скачкообразным. Он развивается с ростом скорости сдвига в пределах примерно одного десятичного порядка по $\dot{\gamma}$ и выражается в прогрессивно уменьшающейся степени сцепления частиц муки в области срыва и затем в росте ширины этой области до некоторого предельного значения. Следовательно, явление сверханомалии вязкости в данном случае не связано со структурными изменениями во всей массе образца. Оно является локальным, поэтому положение его в массе деформируемого материала весьма важно. Например, в практически важном случае течения расплава через канал от положения поверхности «внутреннего срыва» относительно центра канала зависит расход через него.

Можно предположить, что при течении материала в капиллярах образование внутреннего срыва наиболее вероятно у стенки канала, т. е. в области максимальных напряжений сдвига τ , так что в этом случае внешне явление внутреннего срыва полностью аналогично явлению пристенного скольжения, и при проведении вискозиметрических исследований капиллярным

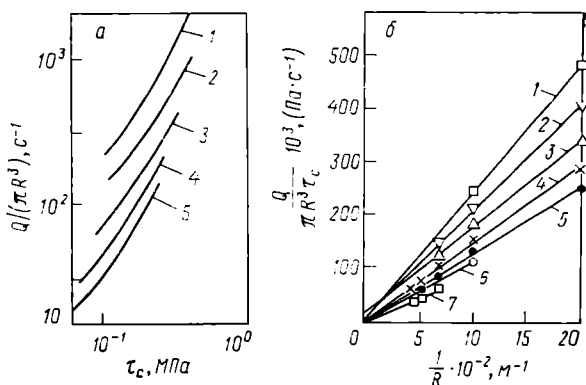


Рис. 2.20. Зависимость $Q/(\pi R^3)$ от напряжения сдвига на стенке канала τ_c (а) и представление этих данных в координатах $[Q/(\pi R^3 \tau_c)] - (1/R)$ для ряда фиксированных значений τ_c (б). Значения диаметра капилляра (а):

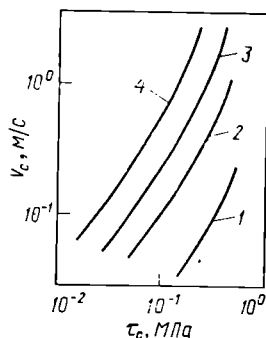
1 — 1 мм; 2 — 2; 3 — 3; 4 — 4; 5 — 5 мм.

Значения напряжений сдвига на стенке капилляра (б):

1 — 0,398 МПа; 2 — 0,316; 3 — 0,251; 4 — 0,200; 5 — 0,158; 6 — 0,126; 7 — 0,100 МПа.

Рис. 2.21. Зависимость скорости пристенного скольжения V_c от напряжения сдвига на стенке канала τ_c и температуры:

1 — 368 К; 2 — 393; 3 — 413; 4 — 433 К.



методом эти два явления не могут быть разделены. Опыты по капиллярной вискозиметрии проводились с целью количественной оценки этого суммарного эффекта на наборе капилляров с диаметром от 1 до 5 мм с интервалом 1 мм. Учет входовых эффектов был выполнен по известной методике [23, с. 208—210].

Неинвариантность полученных при этом кривых течения от диаметра капилляра (рис. 2.20, а) подтверждает наличие отмеченного эффекта в пристенной области канала.

В уравнении расхода через круглый канал (2.66) при наличии скорости пристенного скольжения V_c появляется дополнительное слагаемое:

$$Q = \pi R^2 V_c + \frac{\pi R^3}{\tau_c^3} \int_0^{\tau_c} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (2.81)$$

Преобразуем это выражение следующим образом:

$$\frac{Q}{\pi R^3 \tau_c} = \frac{V_c(\tau_c)}{\tau_c} \frac{1}{R} + \frac{1}{\tau_c^4} \int_0^{\tau_c} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (2.82)$$

Отсюда видим, что при $R \rightarrow \infty$ первое слагаемое (вклад в общий расход, вносимый скоростью пристенного скольжения) стремится к нулю.

Таким образом, если при ряде фиксированных значений τ_c , используя кривые течения (см. рис. 2.20, а), построить кривые в координатах $Q/(\pi R^3 \tau_c) - 1/R$ и экстраполировать их до значения $1/R = 0$, то эти кривые, пересекаясь с осью $Q/(\pi R^3 \tau_c)$, отсекут на ней отрезок, величина которого равна второму слагаемому (2.82), т. е. вкладу в общий расход, вносимому сдвиговым течением массы материала. Результат этой операции приведен на рис. 2.20, б. Из этого рисунка видно, насколько мал вклад в общий расход, обусловленный вязким течением [второе слагаемое уравнения (2.82)], по сравнению с вкладом, вносимым скоростью пристенного скольжения. Оцененные таким образом среднерасходовые скорости $V_{\text{в}}$, обусловленные вязким течением, в диапазоне величины $Q/(\pi R^3)$ от $2 \cdot 10^1$ до 10^4 с^{-1} в 10—100 раз меньше скоростей пристенного скольжения. Это свидетельствует о практически «пробковом» режиме течения с плоским профилем скорости в реальных каналах промышленного оборудования. Поэтому при практических расчетах, связанных с определением расхода через каналы, оказывается воз-

можным с достаточной степенью точности пренебрегать скоростью V_b . Таким образом, практическую ценность приобретают не истинные кривые течения $\dot{\gamma}(\tau, T)$, а зависимости $V_c(\tau_c, T)$, которые и определены из первичных данных (при условии пренебрежения скоростью V_b) как зависимости $Q/(\pi R^2) = f(\tau_c T)$, приведенные на рис. 2.21. По форме кривые близки к степенной функции и удовлетворительно описываются уравнением

$$\tau_c = k_c V_c^s; \quad k_c = k_{c0} \exp \left(\frac{E_c}{RT} \right) \quad (2.83)$$

где k_{c0} , s , E_c — константы, которые для композиции 03-010-02 равны $k_{c0} = 0,158 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^{s+2}$; $s = 0,536$; $E_c = 9,14 \text{ кДж/моль}$.

Константа E_c в данном случае теряет свой первоначальный физический смысл энергии активации вязкого течения; она является некоей активационной характеристикой совокупного процесса пристенного скольжения и внутреннего срыва.

2.6. ОСОБЕННОСТИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ДЛИННОВОЛОКНИСТЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

Наличие длинноволокнистого наполнителя в расплаве вызывает ряд эффектов, отличающих процесс течения указанных композиционных материалов от течения чистых полимеров, а также композиций с порошкообразным наполнителем. Это связано с процессами ориентации наполнителя и его разрушения, разделения наполнителя и полимера и образования характерных слоев, а также специфичным влиянием на реологические свойства волокон наполнителя, имеющего размеры, сравнимые с размерами каналов, в которых происходит течение композиции.

С формальной точки зрения в большинстве случаев введение волокнистого наполнителя приводит к повышению вязкости композиции, однако в ряде случаев отмечаются исключения из этого правила. Так, в работе [24] отмечается резкое отличие вязкости композиции от вязкости полимера в области малых скоростей сдвига и резкое уменьшение влияния стекловолокнистого наполнителя в области высоких скоростей. Отмечается, что при содержании волокнистого наполнителя до 10% (масс.) вязкость композиции практически не отличается от вязкости чистого полимера. Указанные особенности реологических свойств волокнистых композиций объясняются спецификой поведения наполнителя в процессе деформирования расплава. При анализе необходимо выделить процессы течения композиций с высокой концентрацией наполнителя, а также малой и большой длиной волокнистого наполнителя.

Для волокнистых суспензий образование сплошной сетки каркаса наблюдается при малых значениях концентрации наполнителя. Так, образование сетки капроновых волокон диамет-

ром 0,023 мм и длиной 1,25 мм в смоле ЭД-5 наблюдалось [25] при концентрации наполнителя начиная с 5%.

В процессе течения волокнистых суспензий с малой концентрацией наполнителя в области малых скоростей сдвига наблюдается течение с проскальзыванием «зацеплений» волокон только до некоторого критического напряжения, определяемого прочностью сетки. При высоких скоростях сдвига происходит разрушение сетки, разрозненные части каркаса уплотняются, комкуются, приобретают эллипсоидальную форму с соответствующей ориентацией волокон в комках, которые при сдвиговом течении вращаются и деформируются. При больших скоростях сдвига происходит распад крупных комков на более мелкие, эффективность наполнения системы снижается. Происходит переход жидкости от квазиоднородной к неоднородной.

В процессе течения подводимая энергия затрачивается не только на деформирование среды, но и на разрушение структуры и запасается в среде, что вызывает восстановление структуры после окончания деформирования.

Несколько другой механизм течения и перехода от квазиоднородной жидкости к неоднородной наблюдается при течении высоконаполненных композиций с длинноволокнистым наполнителем при содержании наполнителя 20—50%.

Как и в случае малого содержания наполнителя, в статическом состоянии в композиции образуется пространственная сетчатая структура (каркас), обладающая определенной внутренней прочностью и упругостью за счет сцепления как между волокнами наполнителей (преобладают, по-видимому, механические силы трения), так и между наполнителем и стенкой канала. Прочность каркаса, очевидно, возрастает с увеличением концентрации наполнителя.

При течении композиции при небольших скоростях сдвига может происходить скольжение волокон по стенкам камеры. При этом каркас полностью сохраняется, но деформируется. Поскольку различие между силами трения волокон наполнителя друг по другу и по стенкам канала не очень велико, деформация композиции происходит по всему объему материала. Проявление эффекта пристенного скольжения в области малых скоростей деформации, вероятно, незначительно.

С увеличением скорости сдвига характер скольжения «наружных» волокон несколько меняется. Ввиду отжатия диспергирующей смолы к стенке канала, их скольжение происходит по слою расплава полимера. Волокна ориентируются, но еще не вырываются из основной массы. При этом, вследствие уменьшения трения наружных волокон, сдвиг локализуется в пристенном слое.

Таким образом, могут образовываться две характерные области: пристенный слой с характерной толщиной δ , в котором движется диспергирующая жидкость, и область «сдвига», в которой сосредоточена вся масса волокон. Сетка волокон может

считаться подвергающейся лишь упругой деформации как для случая течения между коаксиальными цилиндрами, так и для случая течения в трубе. Принимая для высокопористой эластичной среды (сетки волокон) коэффициент Пуассона равным нулю, уравнение состояния можно записать в виде [28]

$$\sigma_{ij} = 2\xi e_{ij} (1 - \varepsilon_{\alpha\alpha}) + 4\xi e_{i\alpha} e_{\alpha j} \quad (2.84)$$

или для случая $\kappa = \xi$

$$\sigma_{ij} = 2\xi [e_{ij} (1 - \varepsilon_{\alpha\alpha}) + 2e_{i\alpha} e_{\alpha j}] \quad (2.85)$$

где σ_{ij} — эффективные напряжения в сетке волокон; e_{ij} — конечные деформации сетки волокон; ξ , κ — упругие константы.

Решение задачи о течении волокнистой суспензии в зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами, имеющими радиус наружного цилиндра r_n и внутреннего r_v , позволяет определить безразмерную толщину пристенного слоя $\delta_0 = \delta/r_v$ как [28]:

$$\delta_0^3 = \omega^2 \eta^2 (h^2 - 1) / [8G_1 h^2 (h^2 + 1)]$$

где ω — угловая скорость внутреннего цилиндра; η — вязкость диспергирующей среды; G_1 — эффективный модуль упругости при сдвиге; δ — толщина пристенного слоя; $h = r_n/r_v$.

Существуют некоторые особенности течения волокнистых суспензий в каналах различной формы. При «стержневом» течении волокнистой суспензии в цилиндрических каналах средняя скорость течения может зависеть от разности скоростей фаз в «ядре течения», но эффективные модули упругости при стержневом течении, равные $E_1^2 = \mu^2 / \left(\frac{\kappa}{\xi} - 1 \right)$ для уравнения состояния (2.84) и $E_2 = \xi$ для уравнения состояния (2.85), не зависят от радиуса канала. В то же время при деформировании в зазоре между коаксиальными цилиндрами в области неподвижной сетки волокон разность скоростей фаз равна нулю, но эффективные упругие модули при сдвиге зависят от соотношения радиусов h :

$$G_1^2 = \xi^2 \left[\frac{4\kappa}{\xi} - 3 - h^{-2} \right]^{-1} \quad G_2^2 = \xi^2 (1 - h^{-2})^{-1}$$

При дальнейшем увеличении скорости сдвига наружные волокна могут разрушаться или вырываться из основной массы, диспергироваться в расплаве полимера в пристенном слое.

Предельное напряжение τ^* , при котором начинается разрушение сетки волокон, может быть найдено из уравнения [28]

$$\omega^* = \frac{\tau^{*3} (h^2 - 1)}{8\eta G_1^2 h^2 (h^2 + 1)}$$

Приведенные на рис. 2.22 реологические кривые стекловоллокнита типа ДСВ-2-Р-2М (кривые 1—5) и волокнита марки У2-301-07 на основе хлопковых нитей (со средней длиной волокон наполнителя 10 и 15 мм соответственно) имеют три ярко выраженных участка.

Рис. 2.22. Зависимость скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от напряжения сдвига τ_c для композиций с длиноволокнистым наполнителем:

1—5 — ДСВ-2-Р-2М (363 К; диаметр канала: 1—3,5 мм; 2—5 мм; 3—8 мм, 4—10 мм; 5 — неориентированный наполнитель); 6—8 — волокнит марки У2-301-07 (6—413 К, 7—403 К, 8—383 К).

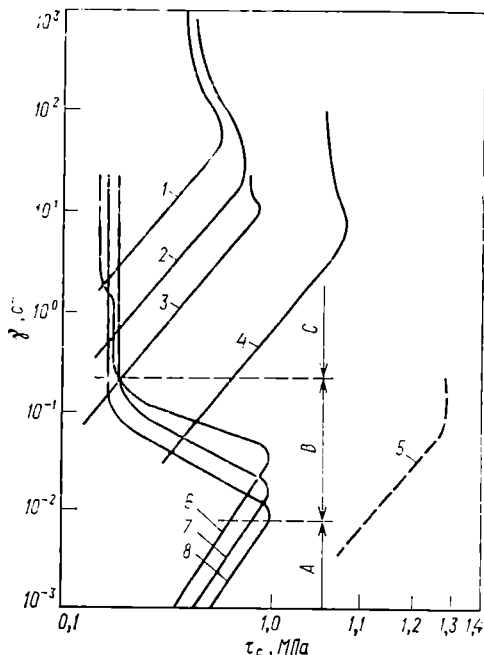
В области низких скоростей сдвига (область А на рис. 2.22) течение композиции может быть описано степенным реологическим уравнением вида (2.13). Однако даже в области малых скоростей деформации реологические кривые неинвариантны относительно размеров канала, в котором происходит течение расплава. Причем в случае

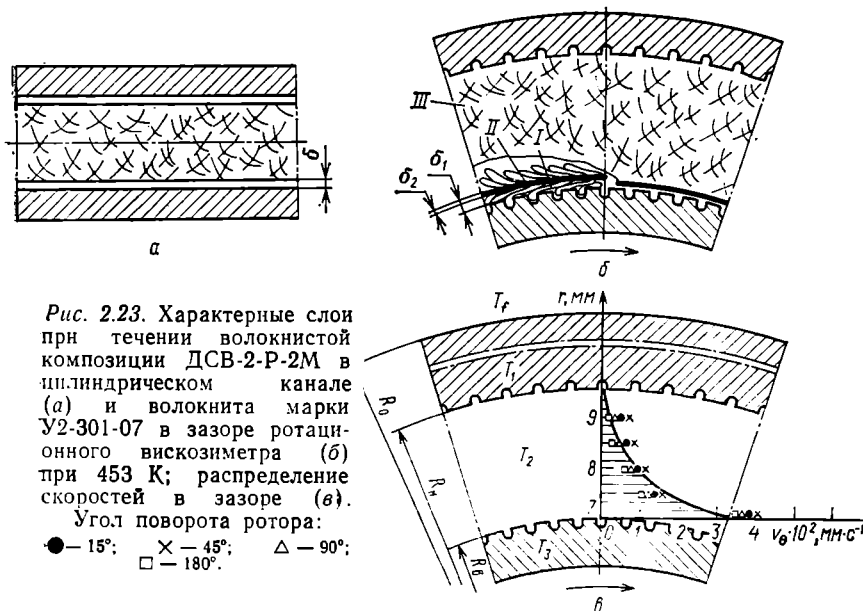
течения в цилиндрических каналах реологические кривые смещаются в сторону более высоких скоростей сдвига с уменьшением диаметра канала. В значительной мере это объясняется различной ориентацией наполнителя в канале. При течении в каналах ориентация складывается в основном во входной зоне и определяется ее конфигурацией. Однако несмотря на это можно отметить, что при течении композиции в каналах, размеры которых больше 0,8 средней длины частиц наполнителя, ориентация волокон напоминает «линии течения». При упомянутых размерах меньше 0,35 наполнитель ориентируется в направлении течения.

Как уже отмечалось ранее, по достижении некоторого предельного напряжения сдвига наблюдается образование пристенного слоя, причем структура слоя, его характеристики определяются как граничными условиями течения, так и размерами и физико-механическими свойствами волокнистого наполнителя.

На рис. 2.23 представлены схемы характерных слоев, образующихся при течении с достаточно высокими скоростями расплава ДСВ-2-Р-2М в цилиндрическом канале (рис. 2.23, а) и волокнита марки У2-301-07 в зазоре ротационного вискозиметра ППР-1 (рис. 2.23, б).

Как показали эксперименты, при течении материала типа ДСВ со стекловолокнистым наполнителем в широком диапазоне скоростей сдвига (10^1 — 10^4 с⁻¹) и температур (363—443 К)





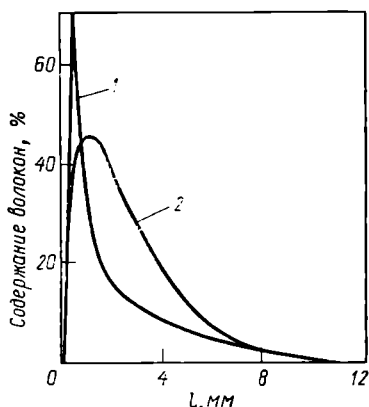
образующийся пристенный слой имеет толщину 0,28—0,33 мм, практически не зависящую от параметров процесса. Изучение фракционного состава наполнителя (кривая 1 на рис. 2.24) показало наличие в слое сильно измельченного наполнителя со средней длиной около 0,2—0,33 мм. Данные о длине волокон измельченного наполнителя достаточно хорошо совпадают с данными работы [29], в которой рассмотрен механизм разрушения волокнистого стеклонеполнителя в тонкой пленке расплава на поверхности материального цилиндра экструдера в зоне плавления. Одинаковая степень разрушения волокнистого наполнителя в обоих случаях указывает на идентичность механизма образования слоя и разрушения волокнистого наполнителя.

В случае течения волокнонаполненных композиций, содержащих наполнитель с малым модулем упругости (например, хлопковый наполнитель пресс-материала У2-301-07) характер пристенного слоя несколько меняется. При исследовании реологических свойств пресс-материала У2-301-07 на ротационном вискозиметре ППР-1 был выявлен следующий механизм образования «пристенного» слоя.

В начальный момент при небольших углах поворота внутреннего ротора (см. рис. 2.23, б), ввиду больших напряжений сдвига на его поверхности, происходит ориентация наполнителя и его частичное разрушение. При этом волокна, защемленные во впадинах ротора, не имеют возможности выйти из этих впадин и при повороте ротора «наматываются» на него. образу-

Рис. 2.24. Кривые распределения длины волокон наполнителя в пристенном слое:

1 — ДСВ-2-Р-2М; 2 — У2-301-07.



ется слой из волокон наполнителя толщиной δ_1 , равной толщине волокна. Характерно, что подобный слой не может образовываться из волокон, имеющих меньшую гибкость и разрушающихся при изгибе под действием касательных напряжений, которые при данной ориентации наполнителя создают в нем большие напряжения изгиба.

Непосредственно к описанному прилегает второй слой толщиной δ_2 , состоящий в основном из чистой смолы и образующийся за счет ориентации волокон наполнителя в характерных областях деформации I и III (см. рис. 2.23, б).

Поскольку формирование слоев происходит при достаточно высоких скоростях сдвига, наполнитель вблизи области деформации II разрушается, но не настолько интенсивно, как в случае стекловолокнистого наполнителя (кривая 2 на рис. 2.24).

Исследования, проведенные с материалом У2-301-07, показали, что формирование слоя заканчивается при величине деформации сдвига около 1,88 рад. Однако в области высоких скоростей сдвига (и напряжений) образование слоя происходит быстрее, так как в процессе преобладает не переориентация волокон, а их разрушение за счет среза. На реологической кривой (см. рис. 2.22) процесс образования пристенного слоя соответствует участку В.

В дальнейшем, после образования пристенного слоя, происходит проворот внутреннего цилиндра с проскальзыванием слоев ориентированного материала по слою смолы II, что является причиной уменьшения напряжений сдвига, несмотря на увеличение скорости деформирования композиции (участок С на рис. 2.22). В ряде случаев наличие участка С на реологической кривой может быть следствием не только образования пристенного слоя, но и так называемого эффекта «срыва» при некотором критическом напряжении сдвига, наблюдаемого при течении «чистых», ненаполненных полимеров. В этом случае «двухслойная» модель течения не применима.

Получаемые на ротационных вискозиметрах зависимости скорости сдвига от касательного напряжения в области высоких скоростей сдвига не могут быть признаны удовлетворительными, так как полученные формально, они не отражают истинной картины деформирования композиции, к тому же в условиях сильной неизотермичности процесса.

Таким образом, установившееся изотермическое течение композиционных материалов, содержащих длинноволокнистый наполнитель, с достаточной точностью может быть описано с использованием моделей, согласно которым в области малых скоростей сдвига течение по всему объему подчиняется степенному реологическому уравнению вида

$$\tau = m(d) \dot{\gamma}^n \operatorname{sign}(\dot{\gamma})$$

в котором параметр $m(d)$ зависит от соотношения размеров канала и длины наполнителя, а в области больших скоростей сдвига возникают характерные зоны деформации композиции (пристенный слой и ядро) с характерными реологическими характеристиками.

Так как толщина пристенного слоя и его состав для каждого композиционного материала могут быть приняты постоянными, не зависящими от параметров процесса течения, получение реологических свойств среды пристенного слоя не вызывает затруднений, и для этого могут быть использованы стандартные вискозиметрические методы.

Получение реологических свойств среды «ядра» течения вызывает большие затруднения вследствие необходимости обеспечения отсутствия пристенного скольжения и учета ориентации наполнителя. На ротационных приборах с рифленой поверхностью роторов надежные данные могут быть получены только в области малых значений скоростей сдвига (область А на рис. 2.22). Расширение диапазона исследования может быть выполнено с использованием следующих методик.

В процессе эксперимента измеряется не усредненная величина скорости сдвига по сечению зазора между роторами вискозиметра, а распределение скоростей сдвига по указанному зазору. С этой целью в прибор помещается предварительно отформованный образец, две половины которого окрашены в различные цвета. После поворота ротора на определенный угол, образец извлекается и измерением смещения линии раздела материала относительно ее первоначального положения может быть получено распределение скоростей среды по зазору, а следовательно, и скоростей сдвига (рис. 2.23, в).

Поскольку волокнонаполненные композиции обладают очень высокой вязкостью, изучение реологических свойств в изотермическом режиме ограничено областью весьма малых скоростей сдвига (до 10^{-1} с^{-1}). При более высоких скоростях наблюдаются значительные тепловыделения, что может вызвать неправильную интерпретацию результатов эксперимента и, как правило, получение заниженных значений напряжений и скоростей сдвига, при которых образуется пристенный слой. Кроме того, полученные данные часто используются для объяснения аномалий течения, которая в действительности наступает при значительно более высоких скоростях сдвига.

Неизотермичность процесса течения композиции в зазоре ротационного вискозиметра может быть учтена решением задачи о течении в упомянутом зазоре (рис. 2.23, в) жидкости, подчиняющейся степенному реологическому закону (2.13), причем константы этого уравнения могут быть определены по испытаниям в области малых скоростей сдвига.

Для случая стационарного процесса система уравнений, включающая уравнения теплопроводности и реологическое уравнение, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d^2 T_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_1}{dr} &= 0 \\ a_2 \left(\frac{d^2 T_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_2}{dr} \right) + \frac{A \tau_{r\theta}^2}{c_{p2} \rho_2 \eta} &= 0; \quad \tau_{r\theta} = \tau_b \left(\frac{R_b}{r} \right)^2 \\ \frac{d^2 T_3}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_3}{dr} &= 0 \\ \eta &= \eta_0^* \exp \left(\frac{E}{RT_2} \right) \cdot \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{1-n} \end{aligned} \quad (2.86)$$

при граничных условиях

$$\begin{aligned} \left. \frac{dT_1}{dr} \right|_{r=R_0} &= \frac{\alpha}{\lambda_1} (T_f - T_1) \Big|_{r=R_0} \\ \lambda_1 \left. \frac{dT_1}{dr} \right|_{r=R_H} &= \lambda_2 \left. \frac{dT_2}{dr} \right|_{r=R_H} \\ T_1 \Big|_{r=R_H} &= T_2 \Big|_{r=R_H} \\ \lambda_2 \left. \frac{dT_2}{dr} \right|_{r=R_B} &= \lambda_3 \left. \frac{dT_3}{dr} \right|_{r=R_B} \\ T_3 \Big|_{r=0} &< 0 \\ T_2 \Big|_{r=R_B} &= T_3 \Big|_{r=R_B} \\ \left. \frac{dT_3}{dr} \right|_{r=0} &= 0 \end{aligned} \quad (2.87)$$

где a_2 — коэффициент теплопроводности расплава композиции; T_1, T_2, T_3, T_f — температуры вращающегося ротора, расплава, корпуса и окружающей среды соответственно; c_{p2} — теплоемкость расплава; ρ_2 — плотность расплава; $\tau_{r\theta}, \tau_b$ — напряжение сдвига в расплаве и на стенке ротора; E — энергия активации вязкого течения; η_0^* — вязкость; n — показатель реологического уравнения; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — коэффициенты температуропроводности материала ротора, расплава и материала корпуса соответственно; α — коэффициент теплоотдачи от стенки корпуса.

Для стекловолокнита ДСВ-2-Р-2М значения коэффициентов в реологическом уравнении, определенные в области скоростей сдвига от 10^{-4} до 10^0 с^{-1} , составляют:

$$E = 164 \cdot \text{кДж}/(\text{моль} \cdot \text{К}); \quad \eta_0^* = 26,37 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2; \quad n = 5,278$$

Система (2.89) после аналитического решения и с введением безразмерных переменных $\xi = (r - R_B)/R_0$ и $\theta_2 = [T_2(r) - T_f]/T_f$ приводится к виду

$$\frac{d^2\theta}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi + \frac{R_B}{R_0}} \frac{d\theta}{d\xi} + \frac{A\tau_0^{1-n}R_0^2}{\lambda_2\eta_0^*T_f} \exp\left[-\frac{E}{RT_f(\theta_2+1)}\right] \left(\frac{\tau_B^{1+n}}{\xi \frac{R_0}{R_B} + 1}\right)^{\frac{1}{2n+2}} = 0$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_2}{d\xi} \Big|_{\xi=0} &= 0; \\ \frac{d\theta_2}{d\xi} \Big|_{\xi=\delta/R_0} &= -\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{Bi R_0}{(\delta + R_0) \left(1 - Bi \ln \frac{\delta + R_B}{R_0}\right)} \theta_2 \Big|_{\xi=\delta/R_0} \end{aligned}$$

где Bi — критерий Био; $\delta = R_n - R_B$.

Решение уравнения (2.86) и (2.87), выполненное с использованием ЭВМ, позволяет определить распределение температуры по толщине деформируемого материала и провести соответствующую коррекцию экспериментальных данных.

Представленные на рис. 2.25 реологические данные для стекловолнока типа ДСВ показывают, что исследования с использованием рассмотренных методик позволяют расширить область получения достоверных данных и отнести начало образования пристенного слоя к скоростям сдвига порядка $10^0 - 10^{-1} \text{ с}^{-1}$.

Значения реологических констант степенного закона, а также напряжение сдвига, при котором развивается пристенный слой, могут быть определены по зависимости расхода от перепада давления при течении композиции в сужающихся конических каналах [26], в котором ввиду специфики геометрии каналов деформирование материала происходит по всему объему, независимо от скорости течения и возникающих напряжений. Следует отметить большую «чувствительность» входных потерь к концентрации наполнителя, поскольку они определяются суммой потерь на перестроение профиля скоростей потока и на разрушение каркаса наполнителя.

Процесс течения волокнистой композиции с длинноволночным наполнителем может сопровождаться разделением (или отжимом) полимера и наполнителя. Причем чем больше длина волокон наполнителя и длина канала, в котором происходит течение, тем больше разделение. В то же время в процессе течения композиций с коротковолночным наполнителем разделение полимера и наполнителя практически не происходит.

Для процесса течения композиций с мелкоизмельченным волночным наполнителем также характерно проявление пристенного эффекта, хотя и в меньшей степени. Проявление пристенного эффекта является следствием особенностей движения цилиндрических частиц наполнителя с большим отношением

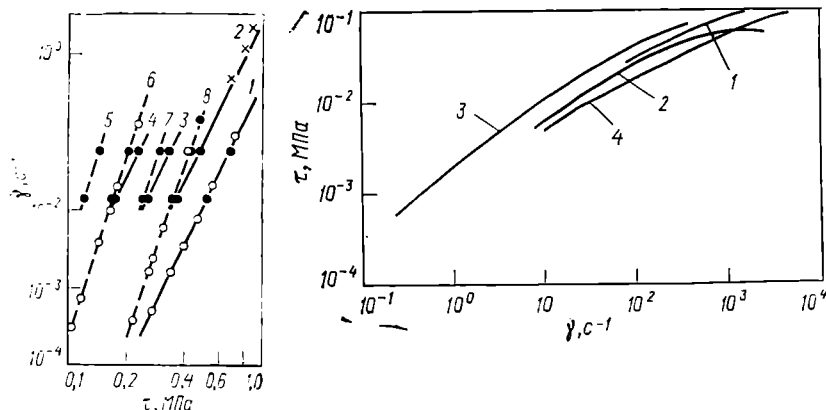


Рис. 2.25. Кривые течения расплава ДСВ-2-Р-2М по испытаниям на ротационном вискозиметре:

1—4 — неориентированный материал; 5—8 — предварительно ориентированный (1, 3 — 363 К; 2—7 — 383 К; 3, 6 — 403 К; 4, 5 — 420 К); ● — по общепринятой методике; ○ — по методике с подкрашенными образцами; X — по расчету с учетом тепловыделений.

Рис. 2.26. Реологические свойства расплава композиции на основе полипропилена, содержащей 10% стекловолокна длиной 1 мм, при 480 К. Диаметр канала:

1 — 0,8 мм; 2 — 1,6; 3 — 3,18 и 6,35 мм; 4 — 1,6 мм (чистый полипропилен).

длины к диаметру вблизи стенки канала, заключающихся в их вращении и миграции.

Если концентрации наполнителя не очень велика и частицы практически не взаимодействуют друг с другом, цилиндрические частицы с началом деформирования расплава приобретают вращательное или колебательное движение, носящее затухающий характер. Со временем складывается их преимущественная ориентация в направлении течения расплава композиции. Увеличение концентрации наполнителя приводит к возрастанию числа взаимодействия частиц и уменьшению степени их ориентации.

Вращательное движение частиц вблизи стенки канала и специфическое распределение напряжений вокруг частиц приводят к их миграции в направлении, перпендикулярном направлению течения композиции. В случае вязкоупругих сред наполнитель мигрирует в область меньших скоростей сдвига, псевдопластичных — в область больших скоростей сдвига. Образуется характерный пристенный слой [27].

Реологические кривые композиций с мелкоизмельченным наполнителем оказываются зависящими от диаметра канала, в котором происходит течение композиции. Представленные на рис. 2.26 реологические кривые для полипропилена с 10%-ным содержанием стекловолокнистого наполнителя подтверждают зависимость реологических свойств от диаметра канала. Опи-

сание кривых может быть выполнено либо степенным законом (вида 2.13), либо уравнением

$$\tau_{ij} = \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}_{ij}} + \eta \dot{\gamma}_{ij}$$

широко используемым для описания трехмерного течения волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. В этом уравнении α_k и A_k — коэффициенты, подбираемые по опытным данным.

При рассмотрении реологических свойств композиций необходимо уделить внимание и ориентации наполнителя, поскольку она влияет не только на сами реологические свойства, но и на свойства получаемых изделий. Сложившаяся в процессе течения ориентация наполнителя сохраняется и в самом изделии, вызывая анизотропию свойств в направлении, перпендикулярном направлению течения композиции.

При трехмерной ориентации плотность осей волокон, ориентированных в заданном направлении, может быть охарактеризована величиной $dN/d\Omega$, где N — количество осей частиц наполнителя, проходящих через телесный угол Ω . При хаотичном распределении волокон

$$\frac{dN}{d\Omega} = \frac{1}{2\pi}$$

Математическое описание процессов ориентации волокон наполнителя ограничено простейшими случаями. Для наиболее интересного случая осесимметричной деформации образца, сопровождающейся его удлинением (степень деформации удлинения n) и плоскопараллельным сдвигом γ в направлении x (рис. 2.27), распределение ориентации первоначально хаотически расположенных волокон описывается уравнением [30]

$$\frac{dN}{d\Omega} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\cos^2 \theta}{n} - \frac{\gamma}{n^2} \sin 2\theta \cdot \cos \Phi + \left(\frac{\gamma^2}{n^2} + n \right) \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \Phi + n \sin^2 \theta \cdot \sin \Phi \right]^{-\frac{3}{2}} \quad (2.88)$$

где θ и Φ — текущие значения углов ориентации наполнителя.

Существенно, что на результирующую ориентацию наполнителя не влияет «путь» достижения этой ориентации. Кроме того, вклад сдвига в ориентацию наполнителя при течении в каналах постоянного поперечного сечения мал, так как он развивается в основном в пристенном слое. Значительная перестройка ориентации происходит в основном при изменении направления потока или сечения канала. При течении в конфузорах достигается высокая степень ориентации наполнителя в направлении течения.

На практике построение кривых распределения ориентации волокон наполнителя может быть выполнено по изучению шли-

Рис. 2.27. К описанию ориентации волокнистого наполнителя.

фов образцов в различных сечущих плоскостях (см. рис. 2.27). На шлифах сечение цилиндрических волокон наполнителя представляет собой эллипс с осями d_1 и d_2 .

Положение большой оси эллипса дает значение одного из углов ориентации наполнителя — α , а из соотношения осей d_1 и d_2 легко может быть найдено значение второго угла — β . Представленные на рис. 2.28 кривые распределения углов ориентации стеклонаполнителя α и β для случая течения расплава стеклонаполненного полипропилена (10% наполнителя) показаны в прямоугольной и полярной системах координат. Распределение углов ориентации было получено по измерениям в двух плоскостях (I и II на рис. 2.27), отличающихся углом наклона ζ_1 к направлению течения композиции. Как видно из приведенных данных, результаты обоих измерений находятся в хорошем соответствии, что подтверждает приемлемость этой методики.

Следует отметить, что максимум ориентации не совпадает с направлением течения, что может быть объяснено дестабилизирующим влиянием взаимодействия отдельных волокон.

Реологические свойства «ядра» течения композиции с ориентированным волокнистым наполнителем несколько отличаются от свойств композиции с неориентированным наполнителем (линии 5—8 на рис. 2.25). Реологические кривые были получены на вискозиметре типа ППР-1 на предварительно ориентированном расплаве ДСВ-2-Р-2М, причем ориентация достигалась

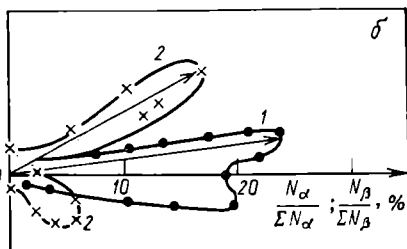
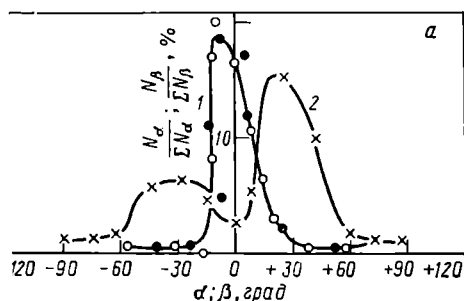
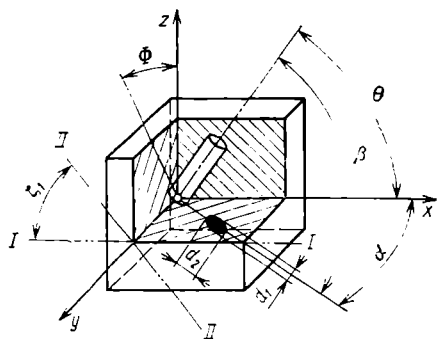


Рис. 2.28. Кривые распределения углов ориентации α (кривые 1) и β (кривые 2) стеклонаполнителя при течении композиции полипропилена с 10%-ным содержанием стекловолкна в прямоугольной (а) и полярной (б) системах координат:

● — по измерениям в плоскости I—I (см. рис. 2.27); ○ — по измерениям в плоскости II—II (там же).

путем поворота ротора на величину не менее 720 градусов. Приведенные данные показывают, что вязкость композиции с ориентированным наполнителем несколько меньше, особенно в области высоких скоростей сдвига. Одновременно наблюдаются различия в показателе степенного реологического закона, которым может быть описан процесс деформации композиции. Указанные отличия вполне понятны, так как течение композиции с ориентированными волокнами наполнителя происходит с меньшим числом взаимодействий между волокнами, что уменьшает ее эффективную вязкость.

2.7. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ПРОЦЕССОВ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВОВ ПОЛИМЕРОВ ЧЕРЕЗ КАНАЛЫ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Рассматриваются наиболее часто встречающиеся в практике переработки полимеров конфигурации каналов, по которым течет ньютоновская и псевдопластичная жидкости:

1) цилиндрический канал; 2) плоская щель; 3) каналы произвольной геометрической формы; 4) цилиндрический кольцевой канал; 5) круглый конический канал; 6) коническая плоская щель.

Реологическое уравнение псевдопластичной жидкости:

$$\tau^m = \dot{\gamma} c$$

где m , c — реологические константы полимеров.

Искомые величинами являются: 1) напряжение сдвига τ ; 2) скорость сдвига $\dot{\gamma}$; 3) линейная скорость потока v ; 4) перепад давления Δp ; 5) объемная производительность Q ; 6) коэффициент геометрической формы (сопротивления) k .

Для цилиндрического канала l , диаметром D (радиусом R), показанного на рис. 2.29, a , напряжение сдвига в потоке текущей жидкости τ и на стенке канала τ_c рассчитывается по формулам

$$\tau = \Delta p \cdot r / (2l); \quad \tau_c = \Delta p \cdot R / (2l)$$

Скорость сдвига в потоке жидкости $\dot{\gamma}$ и на стенке $\dot{\gamma}_c$ равны: для ньютоновской жидкости

$$\dot{\gamma} = 4Qr / (\pi R^4); \quad \dot{\gamma}_c = 4Q / (\pi R^3)$$

для неньютоновской жидкости

$$\dot{\gamma} = \frac{(m+3)\bar{v}_z}{R} \left(\frac{r}{R} \right)^m$$

$$\dot{\gamma}_c = (m+3) Q / (\pi R^3)$$

где $\bar{v}_z = Q/S$ — средняя скорость потока; s — площадь сечения канала.

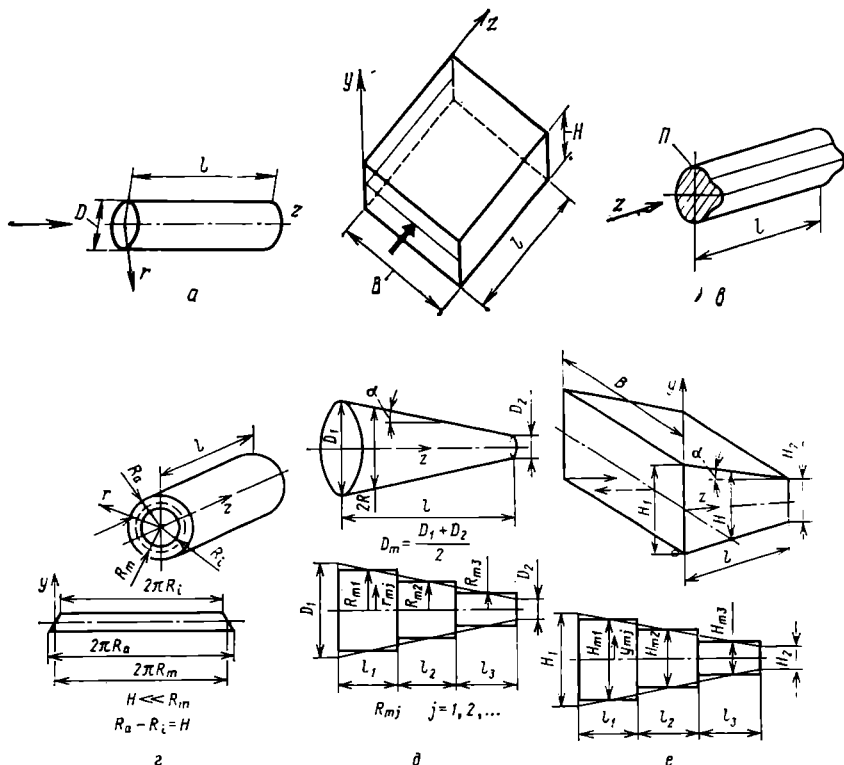


Рис. 2.29. К расчету каналов различной конфигурации:

a — цилиндрического; *б* — плоскощелевого; *в* — произвольной формы с параллельными образующими; *г* — цилиндрического кольцевого; *д* — конического; *е* — призматического.

Линейная v_z и средняя $\bar{v}_z$ скорости потока для ньютоновской жидкости равны

$$v_z = \frac{R^2}{2\eta} \frac{\Delta p}{l} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]; \quad \bar{v}_z = \frac{\Delta p \cdot R^2}{8\eta l}$$

Максимальная скорость составляет

$$v_{z \max} = \Delta p R^2 / (4\eta l) = 2\bar{v}_z$$

Для псевдопластичной жидкости эти величины равны

$$v_z = \frac{1}{c} \left(\frac{\Delta p}{2l} \right)^m \frac{R^{m+1} - r^{m+1}}{m+1}; \quad \bar{v}_z = \frac{R^{m+1}}{(m+3)c} \left(\frac{\Delta p}{2l} \right)^m$$

$$v_{z \max} = \frac{1}{c} \left(\frac{\Delta p}{2l} \right)^m \frac{R^{m+1}}{m+1}$$

Перепад давления в цилиндрических каналах рассчитывается по формулам:

для ньютоновской жидкости

$$\Delta p = 8\eta Q l / (\pi R^4)$$

для псевдопластичной жидкости

$$\Delta p = 2^m (m + 3) Q c / (\pi R^{m+3})$$

Объемная производительность равна:
для ньютоновской жидкости

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{l}$$

для псевдопластичной жидкости

$$Q = \frac{\pi R^{m+3}}{(m + 3) c} \left(\frac{\Delta p}{2l} \right)^m$$

Коэффициент геометрической формы канала равен:
для ньютоновской жидкости

$$k = \pi R^4 / (8l)$$

для неньютоновской жидкости

$$k = \frac{\pi R^{m+3}}{(m + 3) (2l)^m}$$

Для плоской щели, показанной на рис. 2.29, б ($B \gg H$), справедливы следующие соотношения.
Напряжение сдвига:

$$\tau = \Delta p y / l; \quad \tau_c = \Delta p H / l$$

Скорости сдвига:
для ньютоновской жидкости

$$\dot{\gamma} = 12 Q y / (B H^3); \quad \dot{\gamma}_c = 6 Q / (B H)^2$$

для псевдопластичной жидкости

$$\dot{\gamma} = \frac{2 (m + 2) v_z}{H} \left(\frac{2y}{H} \right)^m$$

Линейные скорости:
для ньютоновской жидкости

$$v_z = \frac{H^2 \Delta p}{8\eta l} \left[1 - \left(\frac{2y}{H} \right)^2 \right]; \quad \bar{v}_z = H^2 \Delta p / (12\eta l)$$
$$v_{z \max} = \Delta p \cdot H^2 / (8\eta l)$$

для псевдопластичной жидкости

$$v_z = \left(\frac{\Delta p}{l} \right)^m \frac{1}{c} \left[\frac{(H/2)^{m+1} - y^{m+1}}{m + 1} \right]$$
$$v_z = \frac{1}{(m + 2) c} \left(\frac{\Delta p}{l} \right)^m \left(\frac{H}{2} \right)^{m+1}$$
$$v_{l \max} = \left(\frac{\Delta p}{l} \right)^m \frac{1}{c} \frac{(H/2)^{m+1}}{m + 1}$$

Перепад давления в плоской щели ($B \gg H$):
для ньютоновской жидкости

$$\Delta p = 12\eta Ql / (BH^3)$$

для псевдопластичной жидкости

$$\Delta p = \left[\frac{2^{m+1} (m+2) Qc}{BH^{m+2}} \right]^{1/m} l$$

Объемный расход:

для ньютоновской жидкости

$$Q = BH^3 \Delta p / (12\eta l)$$

для псевдопластичной жидкости

$$Q = \frac{BH^{m+2}}{(m+2) 2^{m+1} c} \left(\frac{\Delta p}{l} \right)^m$$

Коэффициент геометрической формы:

для ньютоновской жидкости

$$k = BH^3 / 12l$$

для псевдопластичной жидкости

$$k = \frac{BH^{m+2}}{(m+2) 2^{m+1} l^m}$$

Для каналов произвольной формы, но с параллельными образующими (рис. 2.29, в) выполняются следующие соотношения.

Напряжение сдвига на стенке канала

$$\tau_c = (\Delta p / l) (s / \Pi)$$

где Π — периметр сечения канала.

Скорости сдвига для ньютоновской жидкости

$$\dot{\gamma} = 2Q\Pi / s^2; \quad \dot{\gamma}_c = 4Q / (\pi R_0^3)$$

где $R_0 = \sqrt{s/\pi}$ — эквивалентный радиус канала.

Средняя скорость потока для ньютоновской и псевдопластичной жидкостей равна соответственно

$$\bar{v}_z = \frac{\Delta p \cdot s^2}{2\eta l \cdot \Pi^2}; \quad v_z = \frac{2s^{m+1}}{(m+3)\Pi^{m+1}} \frac{1}{c} \left(\frac{\Delta p}{l} \right)^m$$

Перепад давления рассчитывается по формулам (для ньютоновской и псевдопластичной жидкостей соответственно)

$$\Delta p = \frac{2\Pi^2\eta Q}{s^3} l; \quad \Delta p = \left[\frac{(m+3)\Pi^{m+1} Qc}{2s^{m+2}} \right]^{1/m}$$

Объемный расход для ньютоновской и псевдопластичной жидкостей соответственно равен

$$Q = \frac{\Delta p s^3}{2\eta l u^2}; \quad Q = \frac{2s^{m+2}}{(m+3)\Pi^{m+1}c} \left(\frac{\Delta p}{l}\right)^m$$

Коэффициенты геометрической формы в случаях течения ньютоновской и псевдопластичной жидкостей рассчитываются соответственно по формулам

$$k = \frac{s^3}{2\Pi^2}; \quad k = \frac{2s^{m+2}}{(m+3)\Pi^{m+1}l^m}$$

Для цилиндрического кольцевого канала (рис. 2.29, з) действительны следующие формулы.

Напряжения сдвига τ и τ_c равны

$$\tau = \Delta p \cdot y/l; \quad \tau_c = H\Delta p/2l = (R_a - R_i) \Delta p/2l$$

где $H = R_a - R_i$; $H \ll R_m$.

Скорости сдвига $\dot{\gamma}$ и $\dot{\gamma}_c$:

для ньютоновской жидкости

$$\dot{\gamma} = 6Qy/(\pi R_m H^3); \quad \dot{\gamma}_c = 3Q/(\pi R_m H^2)$$

для псевдопластичной жидкости

$$\dot{\gamma} = \frac{2(m+2)}{H} \bar{v}_z \left(\frac{2y}{H}\right)^m; \quad \dot{\gamma}_c = \frac{(m+2)Q}{\pi R_m H^2}$$

Линейные скорости потока рассчитываются по формулам: для ньютоновской жидкости

$$v_z = \frac{H^2 \Delta p}{8\eta l} \left[1 - \left(\frac{2y}{H}\right)^2\right]; \quad \bar{v}_z = H^2 \Delta p/(12\eta l); \quad v_{z \max} = H^2 \Delta p/(8\eta l)$$

для псевдопластичной жидкости

$$v_z = \frac{1}{(m+1)c} \left(\frac{\Delta p}{l}\right)^m \left[\left(\frac{H}{2}\right)^{m+1} - y^{m+1}\right];$$

$$\bar{v}_z = \frac{1}{(m+1)c} \left(\frac{\Delta p}{l}\right)^m \left(\frac{H}{2}\right)^{m+1}$$

$$v_{z \max} = \frac{1}{(m+1)c} \left(\frac{\Delta p}{l}\right)^m \left(\frac{H}{2}\right)^{m+1}$$

Для расчета перепада давления получены соответственно уравнения

$$\Delta p = \frac{6Q\eta}{\pi R_m H^3} l; \quad \Delta p = \left[\frac{2^m(m+2)Qc}{\pi R_m H^{m+2}}\right]^{\frac{1}{m}}$$

Объемная производительность для рассматриваемых случаев равна

$$Q = \frac{\pi R_m H^3 \Delta p}{6 \eta l}; \quad Q = \frac{\pi R_m H^{m+2}}{(m+2)c} \left(\frac{\Delta p}{2l} \right)^m$$

Коэффициенты геометрической формы составляют

$$k = \frac{\pi R_m H^3}{6l}; \quad k = \frac{\pi R_m H^{m+2}}{(m+2)(2l)^m}$$

Круглые конические каналы (рис. 2.29, *д*) условно делятся по длине на несколько участков, которые заменяются цилиндрическими.

Тогда напряжения сдвига рассчитываются по формулам

$$\tau_{mj} = r_{mj} \Delta p_{mj} / (2l_j); \quad \tau_{cmj} = R_{mj} \Delta p_{mj} / (2l_j)$$

где j — число условно вводимых цилиндрических участков на длине рассматриваемого канала; τ_{mj} — напряжение сдвига при $l_j/2$.

Скорости сдвига рассчитываются по формулам: для ньютоновской жидкости

$$\dot{\gamma}_{mj} = \frac{4Qr_{mj}}{\pi R_m^3}; \quad \dot{\gamma}_m = \frac{64Qr_m}{4\pi(R_1 + R_2)}$$

где $\dot{\gamma}_m$ — скорость сдвига при $(R_1 + R_2)/2 = R_m$.

для псевдопластичной жидкости

$$\dot{\gamma}_c = \frac{8(m+3)Q}{\pi(R_1 + R_2)^3}$$

где $\dot{\gamma}_c$ — скорость сдвига на стенке канала при $R_m = (R_1 + R_2)/2$.

Аналогично для линейных скоростей потока имеем: для ньютоновской жидкости

$$v_{zj} = \frac{R_{mj}^2 \Delta p_{mj}}{4\eta l} \left[1 - \left(\frac{r_{mj}}{R_{mj}} \right)^2 \right]$$

$$\bar{v}_{zj} = R_{mj}^2 \Delta p_{mj} / (8\eta l); \quad v_{z \max} = R_{mj}^2 \Delta p_{mj} / (4\eta l)$$

для псевдопластичной жидкости

$$v_{zj} = \frac{1}{c} \cdot \frac{\Delta p_{mj}}{2l_j} \cdot \frac{R_{mj}^{m+1} - r_{mj}^{m+1}}{m+1}$$

$$\bar{v}_z = \frac{1}{(m+3)c} \left(\frac{\Delta p_{mj}}{2l_j} \right)^m R_{mj}^{m+1}$$

$$v_{z \max j} = \left(\frac{\Delta p_{mj}}{2l_j} \right)^m \frac{R_{mj}^{m+1}}{m+1} \cdot \frac{1}{c}$$

Перепад давления рассчитывается по формулам: для ньютоновской жидкости

$$\Delta p_{mj} = 8Q\eta l / (\pi R_{mj}^4), \quad \text{где} \quad l = \sum l_j$$

$$\Delta p = \sum \Delta p_{mj}$$

для псевдопластичной жидкости

$$\Delta p_{mj} = \left[\frac{(m+3) 2^m Q_c}{\pi R_{mj}^{m+3}} \right]^{\frac{1}{m}}$$

Объемный расход через рассматриваемый канал равен:
для ньютоновской жидкости

$$Q = \frac{\pi R_m^4 \Delta p}{8 \eta l} = \frac{\pi R_{mj}^4}{8 \eta} \frac{\Delta p_{mj}}{l_j}$$

для псевдопластичной жидкости

$$Q = \frac{\pi R_{mj}^{m+3}}{(m+3) c} \left(\frac{\Delta p_{mj}}{2 l_j} \right)^m$$

Коэффициенты геометрической формы каналов равны:
для ньютоновской жидкости

$$k_{mj} = \pi R_{mj}^4 / (2 l_j); \quad k_m = \pi R_m^4 / (8 l)$$

для псевдопластичной жидкости

$$k_{mj} = \frac{\pi R_{mj}^{m+3}}{(m+3) (2 l_j)^m}; \quad k_m = \frac{\pi R_m^{m+3}}{(m+3) (2 l)^m}$$

При рассмотрении призматического конического канала (рис. 2.29, е) аналогично предыдущему случаю вся длина канала разбивается на ряд элементарных участков плоской щели. В этом случае напряжения сдвига рассчитываются по формулам

$$\tau_{mj} = y_{mj} \Delta p_{mj} / l_j; \quad \tau_c = H_{mj} \Delta p_{mj} / (2 l_j)$$

причем τ_{mj} — напряжения сдвига при $l_j/2$.

Скорости сдвига соответственно равны:

для ньютоновской жидкости

$$\dot{\gamma} = \frac{12 Q y_{mj}}{B H_{mj}^3}; \quad \dot{\gamma}_m = \frac{96 Q y_m}{B (H_1 + H_2)^3}; \quad \dot{\gamma}_c = \frac{24 Q}{B (H_1 + H_2)^2}$$

где $\dot{\gamma}_m$ — скорость сдвига при $H_m = (H_1 + H_2)/2$.

для псевдопластичной жидкости

$$\dot{\gamma}_c = \frac{8 (m+2) Q}{(H_1 + H_2)^2 B}$$

где $\dot{\gamma}_c$ — скорость сдвига на стенке при $H_m = (H_1 + H_2)/2$.

Линейные скорости потока равны:

для ньютоновской жидкости

$$v_{zj} = H_{mj}^3 \Delta p_{mj} / (8 \eta l); \quad v_{z \max j} = H_{mj}^2 \Delta p_{mj} / (8 \eta l)$$

для псевдопластичной жидкости

$$v_{zj} = \frac{1}{c} \left(\frac{\Delta p_{mj}}{l_j} \right)^m \frac{(H_{mj}/2)^{m+1} - y_{mj}^{m+1}}{m+1}$$

$$\bar{v}_z = \frac{1}{(m+2)c} \left(\frac{\Delta p_{mj}}{l_j} \right)^m \left(\frac{H_{mj}}{2} \right)^{m+1}$$

$$v_{z \max j} = \left(\frac{\Delta p_{mj}}{l_j} \right)^m \frac{(H_{mj}/2)^{m+1}}{(m+1)c}$$

Для перепада давления по длине канала в этом случае применимы формулы

$$\Delta p_{mj} = \frac{12\eta Q}{BH_m^3} l_j; \quad \Delta p_{mj} = \left[\frac{(m+2) 2^{m+1} Qc}{B (H_{mj})^{m+2}} \right]^{\frac{1}{m}}$$

причем $\Delta p = \Sigma \Delta p_{mj}$.

Объемный расход равен:

для ньютоновской жидкости

$$Q = BH_m^3 \Delta p / (12\eta l) = BH_m^3 j / (12\eta); \quad k_m = BH_m^3 / (12l)$$

для псевдопластичной жидкости

$$Q = \frac{BH_m^{m+2}}{(m+2) 2^{m+1} c} \left(\frac{\Delta p_{mj}}{l_j} \right)^m$$

Коэффициенты геометрической формы каналов рассчитываются по формулам:

для ньютоновской жидкости

$$k_{mj} = B (H_{mj})^3 / (12l_j); \quad k_m = BH_m^3 / (12l)$$

для псевдопластичной жидкости

$$k_{mj} = \frac{B (H_{mj})^{m+2}}{(m+2) 2^{m+1} l_j^m}; \quad k_m = \frac{BH_m^{m+1}}{(m+2) 2^{m+1} l_m}$$

Для рассмотренных конических каналов индекс «mj» означает, что искомые величины найдены для элементарных участков, а индекс «m» при искомым величинах относится ко всему каналу.

ГЛАВА 3

Технология и оборудование подготовительного производства

3.1. НАЗНАЧЕНИЕ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Технология подготовительного производства в промышленности пластмасс охватывает большое число способов обработки исходных материалов, основной целью которой является обеспечение высокого качества конечного продукта [71]. В тех-

нологии пластмасс подготовительное производство является промежуточным звеном между производством исходных полимеров и их переработкой, т. е. изготовлением из них полуфабрикатов. На всех трех этапах технологии пластмасс применяются процессы дозирования, нагнетания, хранения и упаковки.

В подготовительном производстве преимущественно осуществляют такие процессы, которые облегчают и улучшают переработку полимеров. Основное назначение подготовительного производства — улучшение перерабатываемости полимеров, модификация свойств полимеров в соответствии с требованиями к конечным продуктам, обеспечение проведения экономически выгодных процессов производства изделий с хорошими эксплуатационными свойствами. При этом рассматривается главным образом тепло- и массообмен, которые реализуются при смешении и диспергировании под воздействием тепловой и механической энергии.

Наряду с подготовкой исходных компонентов (например, стабилизаторов, пластификаторов, смазывающих веществ, красителей и др.) часто требуется удалить низкомолекулярные вещества (например, влагу, остаточные мономеры, растворители) и придать полимеру с наполнителями хорошую перерабатываемость.

Ниже приведены процессы подготовительного производства промышленности переработки пластмасс:

Модификация материала

Совмещение: смешение сыпучих материалов с сыпучими, сыпучих с жидкостями, жидкостей с жидкостями, жидкостей с газами; пропитка; растворение; суспендирование; вспенивание.

Разделение: сортировка твердых веществ; удаление жидкости из твердых частиц (сушка); удаление газов и летучих веществ из твердых частиц.

Формование материала

Агломерация: грануляция, таблетирование, уплотнение.

Измельчение: дробление, диспергирование.

3.2. СПОСОБЫ И ОСОБЕННОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ

В подготовительном производстве промышленности пластмасс особенно большое значение имеет совмещение исходных компонентов смеси. Существует множество разновидностей процессов смешения, осуществляемых с применением различных смесителей [71—74]¹. Смесии делятся на гомогенные и гетерогенные. Гомогенная смесь во всех точках объема имеет одинаковые свойства, т. е. в ней существует только одна фаза. В отличие от химических соединений такая смесь не имеет определен-

ной точки плавления и кипения. Свойства гетерогенной смеси не одинаковы в различных точках, так как в ней имеется две или больше фаз, отделенных друг от друга границами раздела.

В подготовительном производстве решается множество задач по смешению. При этом отдельные компоненты смеси находятся в различных состояниях. Ниже приведены различные варианты смешения:

<i>Исходные вещества</i>	<i>Примеры смешения</i>
Два твердых вещества	Смешение порошкообразного или гранулированного полимера с порошкообразными компонентами (стабилизаторами, мягчителями, смазывающими веществами и т. д.)
Твердое вещество и высоковязкая жидкость	Введение твердых веществ в расплавы полимеров
Твердое вещество и низковязкая жидкость	Смешение жидких пластификаторов и стабилизаторов с порошкообразным полимером в производстве паст
Две высоковязкие жидкости	Смешение расплавов различных полимеров при получении ударопрочного полистирола и АБС-пластика
Высоковязкая и низковязкая жидкости	Смешение компонентов при производстве пенополиуретана; смешение паст с растворителями в производстве органических коллоидных растворов
Две низковязкие жидкости	Смешение компонентов при переработке эпоксидных смол

Особенности изготовления смесей в подготовительном производстве связаны с разнообразием структур вязкопластичных жидкостей — растворов или расплавов полимеров, смешение которых требует особого подхода; с относительно малой текучестью компонентов смеси, препятствующей появлению турбулентности и этим затрудняющей процесс смешения; с большими трудностями равномерного распределения в смеси компонентов с относительно малым процентным содержанием (стабилизаторов, смазок, красителей, активаторов и т. д.).

В подготовительном производстве получают смеси различного состава и с различными физическими свойствами. Для переработки готовят суспензии, пасты, растворы, порошки и смеси порошков, агломераты, таблетки и гранулы.

На процессы смешения главным образом оказывают влияние три фактора: 1) конструкция смесителя; 2) тип, состояние и концентрация компонентов смеси; 3) технологические режимы процесса смешения.

Смесители, предназначенные для разных целей, работают по разным принципам и в них достигаются различные эффекты смешения. При подборе типа смесителя для получения требуемого качества смеси необходимо учитывать продолжительность смешения, емкость смесителя и потребляемую энергию. Послед-

нее возможно путем экспериментального определения удельных энергозатрат

$$N_{уд} = Pt/m \quad (3.1)$$

где P — потребляемая мощность (привода, нагрева и охлаждения); t — время смешения; m — масса материала одной шихты (загрузки).

Используя коэффициент $\eta_{см}$ (фактор смешения), можно сравнивать различные смесители по их производительности:

$$\eta_{см} = \frac{N_{уд2}}{N_{уд1}} = \frac{P_2 t_2 m_1}{P_1 t_1 m_2} \quad (3.2)$$

Индексы 1 и 2 относятся к двум сравниваемым смесителям. При сравнении следует учитывать также стоимость смесителя, затраты на его очистку, тип нагревателя, габаритные размеры машины, бесшумность работы, степень автоматизации и т. д.

Компоненты смеси. В состав смеси кроме полимеров входит много других компонентов: мягчители, стабилизаторы, смазывающие вещества, красители (пигменты), наполнители, пластификаторы и др. Концентрация этих компонентов (за исключением наполнителей) относительно невелика. Она лежит в пределах $0,002 \leq c \leq 0,05$ масс.ч. Концентрация c наполнителей колеблется в пределах $0,1 \leq c \leq 0,4$ масс.ч. и зависит как от типов полимера и наполнителя, так и от желаемых свойств изделий. Для изделий специального назначения концентрация наполнителя может быть значительно выше. При выборе рецептуры смеси следует учитывать воздействие отдельных компонентов смеси на полимер, а также взаимодействие компонентов между собой [75]. От правильного выбора рецептуры смеси в значительной степени зависит равномерность физических и химических свойств готовых изделий.

Технология смешения. Технология приготовления смеси определяется в первую очередь составом смеси и состоянием компонентов. Для приготовления смеси, отвечающей предъявляемым требованиям, необходимо выбрать наиболее подходящий вариант технологии. Наряду с периодическими все большее применение находят непрерывные способы получения смеси [76]. Основной предпосылкой при выборе способа приготовления смеси является возможность обеспечения постоянства подачи отдельных компонентов в соответствии с заданной рецептурой.

Технологии приготовления смеси при производстве термопластов и реактопластов сильно различаются. Во втором случае смешение отдельных компонентов часто сопровождается химическими реакциями сшивания макромолекул, поэтому процесс смешения ограничен во времени (в противном случае уже в процессе ввода компонентов смеси возможно протекание химических реакций). Если полимер не претерпевает химических превращений, готовая смесь при соответствующих условиях может сохранять свои свойства длительное время [77]. Исключе-

ние составляют пасты из полимеров и пластификаторов, текучесть которых в зависимости от температуры хранения с течением времени сильно изменяется.

Элементы технологии подготовительного производства. Движение частиц в процессе смешения обусловлено действием сил тяжести или смесительным воздействием мешалки. Для достижения гомогенной (с равномерным распределением компонентов) смеси необходимо, чтобы частицы двигались относительно друг друга во всех направлениях. Наряду с правильным выбором смесителя качество приготавливаемой смеси определяется различными технологическими приемами, среди которых решающее значение имеет разогрев смеси. Он может происходить как за счет подвода тепла от внешних нагревателей, так и за счет диссипативного тепловыделения.

Диссипативное тепло, выделяющееся в единице объема смеси (м^3) в единицу времени (с), равно

$$e_d = \dot{\gamma} \tau \quad (3.3)$$

Суммарная энергия диссипации составляет

$$E_d = \int_0^t \int_V \dot{\gamma}(t, V) \tau(t, V) dtdV \quad (3.4)$$

Из-за сложности процессов течения при смешении аналитическое описание напряженного состояния смеси пока невозможно, т. е. не может быть определена временная и координатная зависимости скоростей $\dot{\gamma}$ и напряжений τ сдвига.

Однако известны факторы, влияющие на напряженное состояние материала. Этими факторами являются температура смеси, частота вращения мешалки, относительная скорость движения частиц смеси, ширина и длина зазора между мешалкой и стенкой, а также термодинамические характеристики компонентов смеси.

При смешении реакционноспособных веществ может происходить нагрев массы за счет тепла экзотермических реакций. В этом случае подвод тепла от внешних нагревателей следует ограничивать, а корпус смесителя и мешалку — охлаждать.

Большое значение имеет последовательность загрузки компонентов смеси. При смешении твердых сыпучих материалов (порошков, агломератов, гранул) загрузка компонентов смеси не вызывает затруднений. Желательно в этом случае загрузку незначительного количества вспомогательных компонентов смеси производить при перемешивании основного компонента, с тем чтобы улучшить процесс диспергирования и провести его за достаточно короткое время.

При смешении сыпучей (порошкообразной) среды с жидкостью большое значение имеет их совместимость и распределение жидкости. В этом случае путем правильного температурно-

го режима можно значительно снизить продолжительность процесса смешения и улучшить качество смеси. При небольшой концентрации порошка получают суспензии. При высокой концентрации порошкообразного материала получают пасты, которые применяются как шпаклевочный материал.

При небольшой концентрации порошкообразных компонентов протекают процессы растворения, набухания и желатинизации, и выравнивание концентраций отдельных компонентов происходит в основном за счет диффузии. Массопередача от жидкой среды к сыпучим веществам является процессом диффузионным и зависит от структуры сыпучего материала. Согласно закону Фика, скорость диффузии g_D определяется уравнением

$$g_D = \frac{m}{At} = -D \frac{dc}{ds} \quad (3.5)$$

где dc/ds — градиент концентрации вещества; t — время; m , A — константы сыпучей среды.

Знак «минус» в правой части уравнения (3.5) показывает, что диффузия осуществляется в направлении уменьшения концентрации жидкой среды. Коэффициент диффузии D для каждой комбинации веществ является физической константой, характеризующей способность одного вещества проникать в среду другого. Коэффициент D часто определяется экспериментально, особенно при диффузии газов или жидкостей в твердые тела. Часто твердые вещества обладают пористостью, при этом следует учитывать диффузию через поры. Коэффициент диффузии сильно зависит от температуры и агрегатного состояния веществ. Значения коэффициента взаимной диффузии некоторых сред при комнатной температуре приведены ниже:

	$D, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
Газы	$10^{-5} - 10^{-4}$
Низкомолекулярные растворы	$10^{-10} - 10^{-9}$
Высокомолекулярные растворы и расплавы	$10^{-12} - 10^{-11}$
Твердые полимеры	$10^{-16} - 10^{-13}$
Твердые низкомолекулярные вещества	$10^{-50} - 10^{-30}$

Удельные энергозатраты при смешении сыпучих материалов незначительны и составляют 0,001—0,02 кВт·ч/кг.

3.3. ТЕОРИЯ СМЕШЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ И ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

3.3.1. Математическое описание качества смесей

Смешение — это механический процесс, целью которого является превращение исходной системы, характеризующейся упорядоченным распределением компонентов смеси, в систему с неупорядоченным, статистически случайным распределением.

В результате процесса смешения в смесителе происходит

взаимное перемещение частиц разных компонентов. При идеальном перемешивании мы должны получить в пределе такую смесь, когда в любой ее точке к каждой частице одного из компонентов примыкают частицы других компонентов в количествах, определяемых заданным соотношением компонентов. Так, если смешиваются три компонента, массы которых относятся как целые числа $p:q:t$, то после идеального смешения в любом малом объеме, взятом в произвольной точке, массы тоже должны относиться как $p:q:t$. Однако такое идеальное расположение частиц в действительности не наблюдается, так как слишком велико число факторов, которые влияют на их взаимные перемещения и от которых в конечном итоге зависит степень смешения.

В любой состав смеси входят два или более компонента, причем при переходе к многокомпонентным системам этот процесс можно рассматривать как смешение каждого компонента поочередно со всей остальной системой. Компонент смеси, концентрация которого выше остальных, называется основным, все другие — ключевыми или распределяемыми.

В зависимости от механизма смешения различают простое и диспергирующее смешение.

Простым смешением называется процесс, в результате которого увеличивается случайность пространственного распределения частиц без изменения их размеров. При этом повышение однородности распределения частиц понимают как увеличение вероятности появления в пробе частиц распределяемых компонентов.

Диспергирующим смешением называется процесс, в результате которого происходит как уменьшение размеров частиц, так и увеличение статистического беспорядка в их распределении. Примером подобного процесса служит введение технического углерода в полиэтилен.

Многие процессы простого смешения происходят самопроизвольно, естественным путем (смешение газов при устранении перегородки в сосуде с различными газами). Для перемешивания двух смешивающихся жидкостей необходим больший промежуток времени. Механизм подобных естественных процессов основан на явлении молекулярной диффузии. Однако этот механизм действует только тогда, когда размер частиц соизмерим с размерами молекул. В случае полимеров скорость диффузии резко снижается и соответственно уменьшается ее роль в процессе смешения.

При бездиффузионном смешении частицы движутся под воздействием различных внешних сил. Если основными компонентами системы являются газы или низковязкие жидкости, находящиеся в турбулентном режиме движения, то процесс перемешивания протекает быстро. Такой процесс называют турбулентным смешением. При перемешивании высоковязких жидкостей (расплавов полимеров) турбулентность обычно не развивается,

а процесс протекает при малых числах Рейнольдса. Этот процесс, называемый ламинарным смешением, протекает с более низкой скоростью.

Идеальной называют смесь, в любой точке которой вероятность присутствия каждого компонента остается постоянной. В микрообъемах перемешиваемой массы возможно бесконечное разнообразие взаимного расположения частиц компонентов. В этих условиях их соотношение в произвольной точке смеси — величина случайная. Поэтому большинство современных критериев оценки качества смеси (степень смешения) основаны на методах статистического анализа.

В двухкомпонентной смеси случайной величиной является содержание распределяемого (ключевого) компонента в микрообъемах. Эта величина может быть полностью охарактеризована, если известны: закон ее распределения; математическое ожидание M (среднее значение); дисперсия σ^2 или среднее квадратичное отклонение s .

Рассмотрим случай, когда проба содержит x частиц (основного и распределяемого компонентов), в том числе b частиц распределяемого компонента; доля частиц этого компонента в общем объеме смеси равна P . Допустим, что в результате анализа отобранных проб получена следующая картина распределения ключевого компонента: для x_1 — вероятность $P(x_1)$; для x_2 — вероятность $P(x_2)$; для x_3 — вероятность $P(x_3)$. Здесь x_i — относительное количество частиц ключевого компонента в i -й пробе; $P(x_i)$ — вероятность появления количества частиц ключевого компонента.

Если смесь случайная, то распределение вероятности $P(x)$ подчиняется биномиальному закону.

Функция $P(x_i)$ и есть закон распределения случайной величины x_i . Тогда вероятность того, что в отобранной пробе содержится точно $x = b/N$ частиц ключевого компонента, дается следующим выражением, представляющим собой плотность биномиального распределения:

$$P(x_i) = \frac{N!}{b!(N-b)!} P^b (1-P)^{N-b} \quad (3.6)$$

Если расхождение концентрации в пробах соответствует закону биномиального распределения, то дисперсия (среднее значение квадрата отклонения случайной величины от ее среднего значения) распределения случайной величины x_i определяется по формуле

$$\sigma^2 = P(1-P)/N \quad (3.7)$$

Таким образом, для определения гомогенности смеси необходимо анализировать отобранные смеси и установить, соответствует ли распределение ключевого компонента биномиальному закону. Если да, то рассматриваемая смесь может считаться гомогенной. Однако для установления гомогенности смеси по

этому методу необходимо отобрать достаточно большое количество проб.

Для анализа процесса смешения сыпучих материалов часто распределение ключевого компонента выражают через среднее значение и статистическую дисперсию.

Среднее значение $\bar{x}$ концентрации ключевого компонента в смеси для N проб равно

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.8)$$

где x_i — концентрация ключевого компонента в i -той пробе.

При этом среднее значение x не должно сильно отличаться от P — доли частиц ключевого компонента в общем объеме смеси. Если эти две величины значительно отличаются друг от друга, то для данной системы метод отбора проб не пригоден.

Величина статистической (выборочной и фактической) дисперсии s^2 , полученная экспериментально, определяется по уравнению

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.9)$$

Определение случайного характера распределения частиц ключевого компонента можно производить, используя статистический критерий «Хи-квадрат» (критерий Пирсона), основанный на сравнении величин s^2 и σ^2 . Если отношение s^2/σ^2 близко к единице, то изменение концентрации в пробах соответствует закону биномиального распределения, смесь является случайной.

Однако, как правило, пригодность смеси определяется не характером распределения ключевого компонента (случайный или неслучайный), а степенью отклонения имеющегося распределения от случайного или, иначе говоря, степень смешения.

Во многих работах предлагаются различные критерии оценки качества смеси, причем наиболее распространенные из них основаны на использовании статистических величин. Однородность смеси характеризуется, например, следующей [2, 84] величиной:

$$J_1 = 1 - \frac{s^2 - \sigma^2}{s_0^2 - \sigma^2} \quad (3.10)$$

где $s_0^2 = P(1-P)$ — дисперсия совершенно несмешанной системы.

По мере приближения смеси к случайной, статическая дисперсия s^2 приближается к предельному минимальному значению. Поэтому величина

$$J_2 = \sigma^2/s^2 \quad (3.11)$$

также применяется как мера степени смешения.

Критерием качества смеси часто служит коэффициент неоднородности (вариации):

$$V_c = \frac{100}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.12)$$

Обычно при анализах смеси определяют не число частиц ключевого компонента в пробах, а его концентрацию c_i в них, что значительно упрощает эксперименты. В этом случае

$$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (c_i - \bar{c})^2} \quad (3.13)$$

где $\bar{c}$ — среднеарифметическое значение концентрации ключевого компонента в пробах (%); c_i — концентрация ключевого компонента в i -ой пробе.

Значение V_c при определенных условиях зависит от массы проб, отбираемых на анализ. Это определяется тем, что среднее квадратичное отклонение соотношения компонентов в пробах даже при идеальном их смешении зависит от числа составляющих их частиц. Отбираемые на анализ пробы, по которым производится статическая оценка качества смеси, должны быть представительными, т. е. иметь такую массу, чтобы случайные отклонения в них соотношения компонентов не затушевывали общей картины распределения вещества по объему контролируемой смеси.

Чем меньше масса проб, тем точнее может быть охарактеризовано качество смеси. Однако уменьшать массу пробы беспредельно нельзя, так как может наступить такой момент, когда избыток или недостаток в пробе одного из компонентов, исчисляемый одной или несколькими его частицами, существенно скажется на величине c_j , а в конечном счете и на величине V_c .

Ю. И. Макаров в своей монографии [84] дает следующие формулы для расчета минимально допустимой массы при G_m :

для неомкующихся материалов

$$G_m = 10^4 d^3 \rho / (2,5 c_0) \quad (3.14)$$

для комкующихся сыпучих материалов

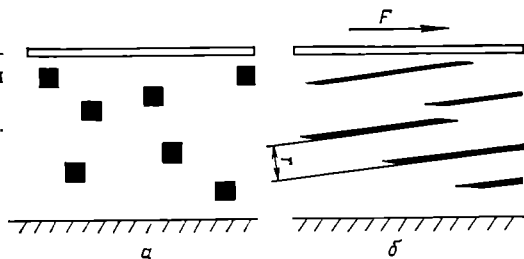
$$G_m = 1,26 \cdot 10^4 d^3 \rho_n / c_0 \quad (3.15)$$

где c_0 — заданная концентрация ключевого компонента (%); d_k — среднеарифметический диаметр частиц ключевого компонента (см); ρ — плотность материала частицы; d — диаметр идеализированных частиц сферической формы (см); ρ_n — среднеарифметическая насыпная плотность.

При выборе на практике массы проб G во избежание ошибок необходимо соблюдать условие $G \geq G_m$. Минимально допустимая масса проб для тонкодисперсных материалов очень невелика. Поэтому для них допустимую массу проб следует

Рис. 3.1. Изменение толщины полос при одноосном сдвиге:

a — до сдвига; b — после сдвига.



определять с учетом необходимой точности анализа и погрешностей измерительной аппаратуры.

В высоковязких средах, к которым относятся расплавы и растворы полимеров, создание турбулентного режима течения практически невозможно. Скорость перемешивания подобных систем поэтому невелика. Кроме того, при перемешивании расплавов и растворов полимеров скорость диффузии настолько мала, что она почти не влияет на однородность смеси.

Критерием качества смеси при ламинарном смешении служит толщина полос r (рис. 3.1), которая находится как среднее расстояние между двумя слоями одного и того же компонента в системе. Было показано [2], что среднее значение толщины полос r можно рассчитывать, исходя из отношения объема системы V к общей площади s поверхностей контакта между компонентами:

$$r = 2V/s$$

Очевидно, что увеличение площади s при неизменном объеме приводит к значительному улучшению качества смеси. Увеличение площади поверхностей контакта происходит под действием деформации сдвига Γ , связанной с толщиной полос соотношением

$$r = \frac{r_n}{\sqrt{1 - 2\Gamma \cos \alpha \cos \beta + \Gamma^2 \cos \alpha}} \quad (3.16)$$

где α и β определяют ориентацию поверхности раздела в пространстве; r и r_n — конечная и начальная толщины полос соответственно.

Из рассмотрения поведения материала, состоящего из разноцветно окрашенных гранул кубической формы, под действием сдвига найдена следующая зависимость [85]:

$$r = r_n / (\Gamma \theta_k) \quad (3.17)$$

где θ_k — доля ключевого компонента.

Предполагается, что элементы кубической формы ключевого компонента не соприкасаются друг с другом. Начальная ориентация отдельных элементов не должна влиять на конечный результат в тех случаях, когда все три измерения частицы одного и того же порядка.

В случае смешения двух жидкостей с различными значениями вязкости

$$r = \frac{r_n}{\Gamma \theta_k} \frac{\mu_0}{\mu_k} \quad (3.18)$$

где μ_0 и μ_k — вязкости основного и ключевого компонентов.

В рабочих объемах смесителей, как правило, имеет место неоднородное поле скоростей сдвига. Поэтому в процессе деформации элементарные частицы смеси подвергаются переменной во времени интенсивности деформирования и к концу процесса смешения имеют различные деформации сдвига Γ . Следовательно, полученная смесь не может быть однозначно определена каким-то значением толщины полос, а должна характеризоваться понятием «средней толщины полос».

Рассмотрим крупную пробу двухкомпонентной смеси, состоящую из частиц белого и черного цветов. Компоненты смеси расположены параллельными чередующимися слоями толщиной l_i для частиц белого цвета и z_i для частиц черного цвета. Вязкость расплавов белого и черного компонентов смеси одинакова, доля черного компонента смеси равна θ_k , а границы раздела параллельны друг другу. При этих условиях дисперсия содержания черного компонента в пробе может быть определена как

$$\sigma^2(x) = n_k \left[\theta_k (1 - \theta_k) - \frac{1}{3} \frac{z_{\min}}{r_{\text{ср}}} \right] = \frac{K}{z_{\min}} \left[\theta_k (1 - \theta_k) - \frac{K}{r_{\text{ср}}} \right] \quad (3.19)$$

где K — размер пробы; $r_{\text{ср}}$ — средняя толщина полос; n_k — число полос; $z_{\min}$ — минимальная толщина пробы.

Таким образом, если смесь представляет чередующиеся слои смешиваемых компонентов, то концентрация компонентов в пробе имеет нормальное распределение и дисперсия ее распределения зависит только от общей концентрации компонента в смеси и средней толщины полос при фиксированном масштабе сравнения. Следует отметить, что крупная проба может быть извлечена из смеси произвольным образом, так как на условие отбора проб не налагалось никаких ограничений. Следовательно, при экспериментальном изучении таких смесей пробы могут иметь произвольную форму, желательно только, чтобы они были одного размера, но и это необязательно, так как они могут быть приведены к единому масштабу сравнения.

Полученные выше зависимости доказывают, что средняя толщина полос может служить характеристикой смеси, столь же строгой, как и математическое ожидание и дисперсия.

3.3.2. Смешение при произвольной деформации сдвига

Рассмотрим двухкомпонентную смесь, которая в исходном состоянии характеризовалась определенной толщиной полос r_1 , причем эта смесь состоит из некоторого количества областей

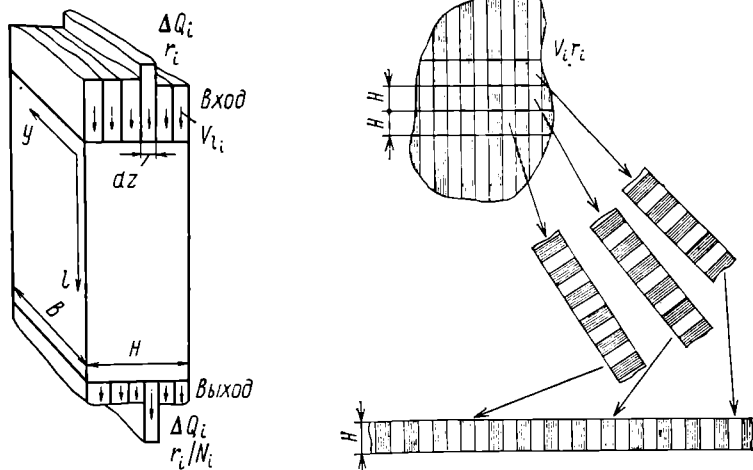


Рис. 3.2. Схема непрерывного смесителя. Пояснение в тексте.

Рис. 3.3. К анализу процесса смешения при произвольной величине деформаций сдвига.

объема V_i . В этих областях толщина полос равна r_{i1} (рис. 3.2). Тогда толщина полос всего объема смеси выражается через толщины полос каждой из рассматриваемых областей как

$$r_1 = \frac{\sum V_i}{\sum (V_i/r_{i1})} \quad (3.20)$$

В самом деле, общее количество полос в i -той области равно

$$K_i = V_i/(r_{i1}BH) \quad (3.21)$$

При этом подразумевается, что все области имеют форму параллелепипедов одинаковой толщины и высоты, а полосы расположены вертикально. В случае произвольной формы области ее можно расчленить на слои элементарной высоты и сгруппировать эти слои в параллелепипеды. Расчленение на слои производится секущими плоскостями, перпендикулярными полосам (рис. 3.3).

Всего полос в смеси общего объема $V = \sum V_i$ будет соответственно

$$K_{\text{п1}} = \sum K_i = \sum \frac{V_i}{r_{i1}BH} \quad (3.22)$$

Предположим, что каждая из областей подвергается деформации сдвига, одинаковой для всего объема i -той области, но изменяющейся при переходе из одной области в другую. Будем считать, что сдвиг осуществляется таким образом, что направ-

ляющие косинусы равны $\cos \alpha = 1$, $\cos \beta = 0$. Тогда, в соответствии с известным уравнением

$$r_{i2} = r_{i1} / \sqrt{1 + \Gamma_i^2} \approx r_{i1} / \Gamma_i \quad (3.23)$$

где r_{i2} — конечная толщина полос; Γ_i — деформация сдвига.

Средняя толщина полос для всего объема смеси после деформации равна

$$r_2 = \frac{\sum V_i}{\sum \left(\frac{V_i}{r_{i1}} \Gamma_i \right)} \quad (3.24)$$

Все величины относятся к i -той области, причем предполагается, что $\Gamma_i^2 \gg 1$.

Количество полос после деформации при приведении объемов соответствующих областей к первоначальной форме и размерам выражается следующим соотношением:

$$K_{пз} = \frac{V_i}{(r_{i1} / \Gamma_i) B H} \quad (3.25)$$

Обозначив $r_2 / r_1 = \Gamma_{ср}$, получим:

$$\Gamma_{ср} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{\sum \left(\frac{V_i}{r_{i1}} \Gamma_i \right)}{\sum \frac{V_i}{r_{i1}}} \quad (3.26)$$

Рассмотрим каждую из сумм, стоящих в знаменателе и числителе последнего выражения:

$$\begin{aligned} \sum \frac{V_i}{r_{i1}} &= \frac{V_1}{r_{11}} + \frac{V_2}{r_{21}} + \dots + \frac{V_n}{r_{n1}} = \\ &= \frac{V_1 r_{21} r_{31} \dots r_{n1} + V_2 r_{11} r_{31} \dots r_{n1} + V_n r_{11} \dots r_{n1}}{r_{11} r_{21} r_{31} \dots r_{n1}} \\ \sum \frac{V_i}{r_{i1}} \Gamma_i &= \frac{V_1 \Gamma_1 r_{21} r_{31} \dots r_{n1} + V_2 \Gamma_2 r_{11} r_{31} r_{41} \dots r_{n1} + \dots + V_n \Gamma_n r_{11} r_{21} \dots r_{n1}}{r_{11} r_{21} \dots r_{n1}} \end{aligned}$$

Отсюда

$$\Gamma_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{V_i \Gamma_i}{r_{i1}} \right) \prod_{j=1}^n r_{j1}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{V_i}{r_{i1}} \right) \prod_{j=1}^n r_{j1}} \quad (3.27)$$

Если величины r_{i1} одинаковы или незначительно отличаются друг от друга, можно принять, что

$$r_{21} r_{31} \dots r_{n1} \approx r_{11} r_{31} \dots r_{n1} \approx \dots \approx r_{11} r_{21} r_{31} \dots r_{(n-1)1}$$

Тогда

$$\Gamma_{ср} = \frac{\sum (V_i \Gamma_i)}{\sum V_i} \quad (3.28)$$

3.4.1. Оборудование для смешения

Классификация оборудования для смешения полимеров затруднительна ввиду его разнообразия как по конструкции и назначению, так и по принципу действия. Это объясняется несколькими причинами. Во-первых, оборудование для смешения пластмасс было заимствовано зачастую из других отраслей промышленности (химической, строительной, пищевой и др.). Во-вторых, компоненты смеси могут находиться в различных начальных состояниях (жидкость, порошок, гранулят) и иметь разные физико-механические свойства. Кроме того, смешение часто сопровождается термодинамическими и химическими процессами. Часто требуется смешивать материалы, очень сильно различающиеся по своим физическим свойствам. Кроме того, часто процесс смешения сопровождается пластикацией материала. Поэтому единой классификации смесителей для пластических масс нет. Однако все же по ряду признаков смесители разделяют следующим образом:

- по конструктивным признакам (барабанные смесители без перемешивающего и с перемешивающим устройствами; смесители с тихоходными и быстроходными роторами; смесители-пластикаторы — одночервячные, многочервячные и дисковые экструдеры, вальцы, ко-кнеттеры);

- по физическому состоянию исходных компонентов (порошок, гранулят, жидкости различной вязкости);

- по характеру процесса смешения (периодического и непрерывного действия);

- по частоте вращения перемешивающего устройства (тихоходные и быстроходные смесители);

- по механизму процесса смешения (с конвективным, диффузионным и конвективно-диффузионным смешением);

- по режиму работы машины (с турбулентным и ламинарным смешением);

- по способу воздействия на смесь (гравитационные, центробежные, сдвиговые смесители);

- по степени автоматизации (ручные, полуавтоматические и автоматические);

- по способу смешения (статические и динамические смесители).

Обычно следуют классификации смесителей по конструктивному признаку, хотя на практике каждый из приведенных выше признаков может быть использован. В процессе развития техники переработки пластмасс созданы универсальные смесители, которые могут быть применены для различных процессов смешения.

В промышленности пластмасс часто применяются быстроходные смесители с вертикальным или горизонтальным распо-

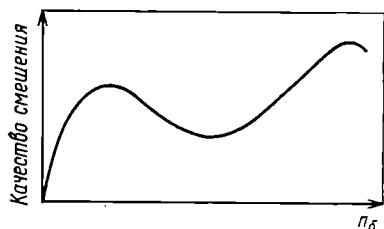


Рис. 3.4. Зависимость качества смешения от частоты вращения барабанного смесителя n_b .

ложением привода, а также смесители закрытого типа и экструдеры.

В некоторых смесителях наряду со смешением можно осуществлять процесс формирования полимеров (например, получение агломератов в скоростных смесителях, получение гранул). Смешение можно совмещать с удалением летучих веществ.

Кроме механических применяются и другие смесители, прежде всего пневматические, пересыпные, а также смешивающие дозаторы, питатели и транспортеры.

К смесителям наряду с обеспечением заданного качества смешения предъявляются следующие требования: кратковременность пребывания материала в смесителе; обеспечение полной выгрузки или самоочистки.

При выборе смесителя для определенных технологических задач следует учитывать следующие параметры: габаритные размеры смесителя, его производительность, затраты на обслуживание, ожидаемые отходы производства, численность обслуживающего персонала, а также стоимость смесителя [79].

Процесс смешения в каждом смесителе зависит не только от его конструктивных особенностей, но и в значительной степени от свойств исходных компонентов смеси. Для интенсивного перемешивания частиц необходимо конструктивными средствами обеспечить двух- или трехмерное движение компонентов смеси. Движение частиц (перемещение частиц) должно происходить с как можно большей скоростью. При конструировании смесителя и его перемешивающего устройства необходимо обеспечить отсутствие «мертвых» (застойных) зон, в которых смесь находилась бы без движения. При приготовлении смесей «порошки — порошки» или «гранулы — порошки» часто применяют связывающие вещества (например, клей) с тем, чтобы предотвратить процесс сепарации компонентов при транспортировке.

Большое применение нашли смесители барабанного типа. Эти смесители представляют собой вращающийся барабан, внутри которого смонтированы устройства (горизонтальные полочки, параллельные оси барабана), улучшающие смешение в осевом направлении. Качество смеси при данной продолжительности смешения зависит от частоты вращения барабана (рис. 3.4). При заданной частоте вращения частицы материала под действием центробежных сил прижимаются к внутренней поверхности барабана, обрушиваются и снова вовлекаются в движение. При некоторой частоте вращения n_b смесительное воз-

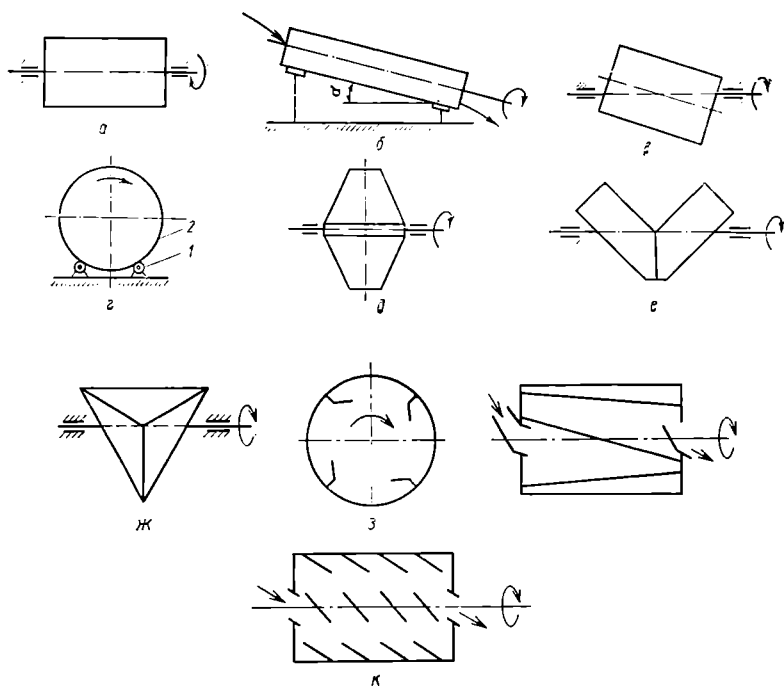


Рис. 3.5. Барабанные смесители:

а — горизонтального типа; *б* — с наклонной осью вращения; *в* — с осью вращения, не совпадающей с осью барабана; *г* — с приводными катками (1 — приводные катки; 2 — барабанный смеситель); *д* — бочкообразный; *е* — V-образный; *ж* — тетраэдрический; *з* — с подъемными полками; *и* — с оребренной внутренней поверхностью; *к* — с наклонными полками.

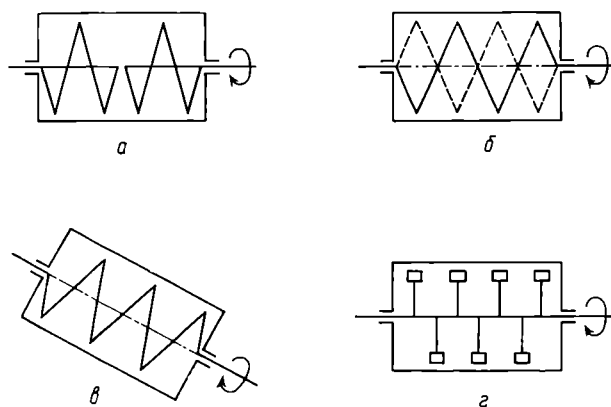


Рис. 3.6. Барабанные смесители с перемешивающими устройствами:

а — с двумя перемешивающими устройствами; *б* — с перемешивающим устройством червячного типа; *в* — с наклонной осью вращения перемешивающего устройства; *г* — с перемешивающим устройством лопастного типа.

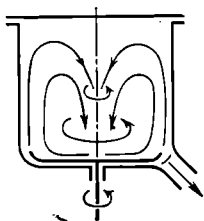


Рис. 3.7. Смеситель центробежного типа.

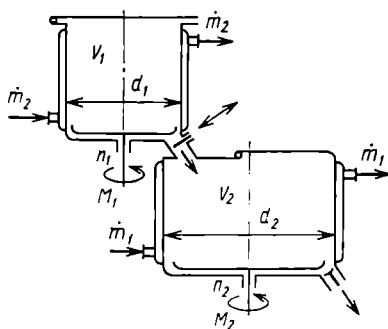


Рис. 3.8. Двухстадийный смеситель.

действие максимально. При больших значениях частоты вращения определенные слои материала не участвуют в процессе смешения. Движение частиц происходит по наклонной поверхности или по параболической траектории, а также по перекрещивающимся траекториям, причем движение частиц — двухмерное. Характер движения частиц зависит от степени заполнения барабана. Путем установки специальных полочек или выбора формы барабана достигается и трехмерное движение частиц. Барабанные смесители (рис. 3.5) преимущественно являются смесителями периодического действия, однако при соответствующей модернизации (например, наклонном расположении оси вращения) могут работать как смесители непрерывного действия.

Барабанные смесители применяются в основном для предварительного приготовления порошкообразных рецептур смеси.

На рис. 3.6 представлены барабанные смесители с перемешивающими устройствами различных типов. Они применяются для сухого смешения и в общем случае не обогреваются.

Перемещение частиц смеси осуществляется перемешивающим устройством в радиальном и аксиальном направлениях. Смесители с вертикальным расположением оси вращения перемешивающего устройства (рис. 3.7—3.9) в технике переработки пластмасс занимают особое место, так как представляют собой универсальный высокопроизводительный тип машин. Эти смесители называют скоростными (центробежными) или турбулентными смесителями. Перемешиваемая масса быстроходным перемешивающим устройством отбрасывается к стенкам смесителя. По стенке аппарата она поднимается вверх и перемещается вновь к центру смесителя. В вертикальное движение смеси вовлекается весь объем материала. Благодаря этому масса материала интенсивно перемешивается и разогревается под воздействием диссипативного тепловыделения. Такая картина наблюдается в случае горячего смешения в обогреваемой камере, при этом время разогрева смеси невелико.

При холодном смешении частоту вращения необходимо выбирать такой, чтобы компенсировать тепловые потери за счет непрерывного контакта частиц материала с холодными стенками смесителя. Это достигается в смесителях центробежного типа (рис. 3.7). Объем смесителя составляет 10—2500 л при производительности до 5000 кг/ч. В промышленности пластмасс такие смесители используются в двух вариантах: с обогреваемыми (смесители горячего смешения) и охлаждаемыми (смесители холодного смешения) камерами, а иногда применяют смесительные агрегаты, в состав которых входят смесители как горячего, так и холодного смешения [80].

Камеры смешения в этом случае снабжены рубашками, в которые подаются теплоноситель или хладагент, благодаря чему поддерживается необходимый температурный режим (см. рис. 3.8). В этом случае рекомендуется следующее соотношение характеристик смесителей холодного и горячего смешения (индекс «1» относится к смесителям холодного, а индекс «2» — к смесителям горячего смешения):

$$\begin{aligned} V_2/V_1 &= 2,5; & d_2/d_1 &= 1,5; & n_1/n_2 &= 5 \div 15; \\ P_{n1}/P_{n2} &= 3 \div 8; & M_1/M_2 &= 3 \div 8 \end{aligned}$$

где n_1, n_2 — частоты вращения мешалок; M_1, M_2 — крутящие моменты на валу мешалок; V_1, V_2 — объемы смесительных камер; d_1, d_2 — диаметр камер смесителей; P_{n1}, P_{n2} — мощности на валах мешалок.

Смеси из твердых веществ и жидкости приготавливаются в аппаратах с мешалкой, в вибрационных машинах, в многочастотных червячных ко-кнеттерах, в корытообразных смесителях различных типов.

Существует группа аппаратов с мешалками в корытообразных смесителях с перемешивающими устройствами различной конфигурации для изготовления растворов, паст и отверждающихся смесей. В последнем случае, особенно при больших размерах перемешивающих устройств, требуется охлаждение камеры смешения, чтобы увеличить срок эксплуатации смесителей. Вертикальное движение вязких жидкостей обеспечивается

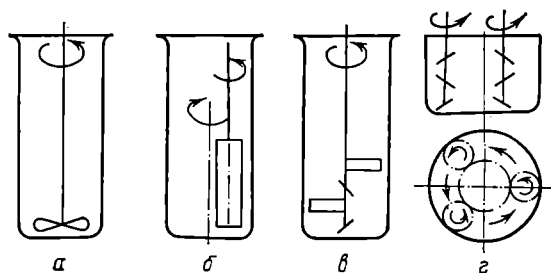


Рис. 3.9. Смесители с мешалками вертикального типа:
а — пропеллерными; б — плоскими; в — лопастными; г — планетарными.

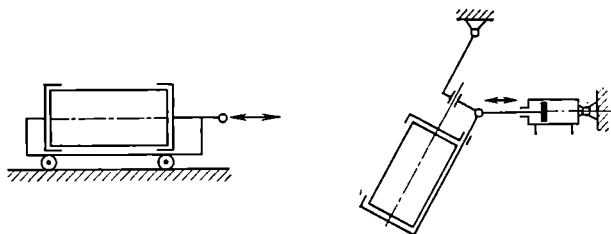


Рис. 3.10. Смесители вибрационного типа.

лопастями перемешивающего устройства (см. рис. 3.9, а, в). Интенсивное перемешивание достигается в таких смесителях, в которых перемешивающее устройство наряду с вращением вокруг собственной оси совершает круговое движение в камере смешения (см. рис. 3.9, б, в, г). Такая картина наблюдается в планетарных смесителях, где в стационарной камере смешения с помощью специального привода вращаются одно (см. рис. 3.9, б) или несколько (см. рис. 3.9, г) перемешивающих устройств вокруг центральной оси камеры смесителя (емкостью от 5 до 1600 л).

Для приготовления растворов наряду с аппаратами с мешалками применяются вибрационные смесители. Движение компонента смеси передается с помощью колебаний с переменной амплитудой и частотой (от 10 до 500 мин⁻¹). Источником вибраций служат эксцентрики или гидро- и пневмоцилиндры с пульсирующей подачей жидкости или воздуха. Интенсивное смешение вязких жидкостей достигается в смесителях вибрационного типа (рис. 3.10).

В некоторых смесителях применяются конические волчки и скребки, приводимые во вращение силами трения. Благодаря относительному движению волчка, смеси и скребка, а также гомогенизатора обеспечивается интенсивный сдвиг, растирание, суспендирование, растворение или эмульгирование компонентов смеси.

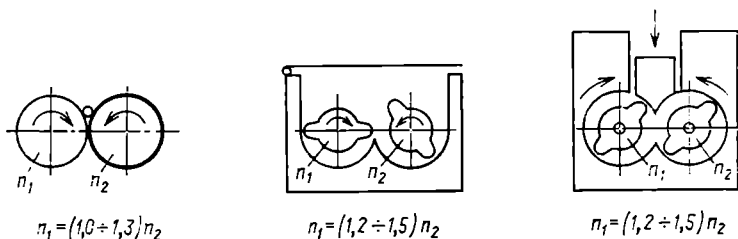
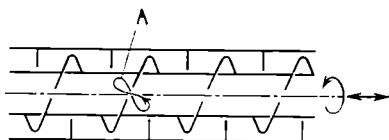


Рис. 3.11. Валковый смеситель.

Рис. 3.12. Двухроторный смеситель.

Рис. 3.13. Смеситель закрытого типа.

Рис. 3.14. Смеситель типа «Ко-кнеттер» (А — траектория движения частиц жидкости).



Смесители-пластикаторы для пластмасс обеспечивают получение гомогенной смеси компонентов с различными физическими свойствами. Процессы смятия и диспергирования могут быть проведены в смесителях различных конструкций. Пластикация полимеров достигается за счет теплопередачи от внешних нагревателей за счет внутреннего разогрева из-за диссипативного тепловыделения. Смешение осуществляется в вязкопластическом состоянии, причем благодаря значительному сдвигу достигается высокая степень диспергирования. Такой же эффект смешения достигается в настоящее время и непосредственно в процессах переработки наполненных полимеров (например, при экструзии и литье под давлением).

В качестве смесителей непрерывного действия применяются как экструдеры различных конструкций (одночервячные, многочервячные и дисковые), так и валковые машины [81—83] (рис. 3.11—3.13). Предпочтение при этом отдают двухчервячным экструдерам благодаря их высокой производительности. Однако из-за вынужденного характера движения перерабатываемого материала в таких экструдерах смешительное воздействие в них ограничено. В связи с этим для различных типов материалов необходимо подобрать соответствующую конструкцию червяков. Смешение в двухшнековых экструдерах осуществляется как в самих винтовых каналах, так и в каналах зацепления червяков.

В смесителях типа «Ко-кнеттер» червяк наряду с вращательным совершает и возвратно-поступательное движение (рис. 3.14).

Благодаря возвратно-поступательному движению червяка, в процессе которого зубья на цилиндре многократно проходят через специальные продольные пазы в нарезке червяка, намного увеличивается эффективность смешения и смятия полимера.

3.4.2. Оборудование для диспергирования (измельчения)

Важнейшими машинами для измельчения в промышленно-сти пластмасс являются ножевые грануляторы (дробилки), применяемые как для производства гранул, так и для дробления отходов производства (бракованных полуфабрикатов и изделий). При этом требуется иногда предварительное измельчение отходов с помощью гильотинных ножей, ленточной или дисковой пилы. В ножевых грануляторах материал измельчается или режется неподвижными ножами и горизонтально или вертикально вращающимися ножевыми головками. По дости-

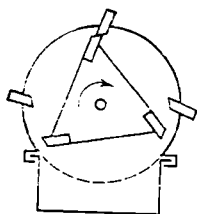


Рис. 3.15. Измельчитель ударного типа (ножевая дробилка).

жении определенных размеров частицы материала через сита попадают в специальную приемную тару. Большая же часть частиц остается в грануляторе до достижения определенной степени измельчения (рис. 3.15).

Для производства определенных фракций порошкообразных материалов применяются мельницы различных типов (конические, шаровые и другие мельницы ударного действия).

Разогрев материала при помоле обуславливает значительные трудности, особенно при помоле вязких, высокоэластических и термочувствительных материалов. Эти трудности можно преодолеть, если материал охладить до температуры ниже температуры хрупкого разрушения (например, жидким азотом до 77 К). При холодном помоле происходит хрупкое разрушение с образованием частиц одинаковых размеров с относительно гладкими поверхностями.

Измельчение красителей и пигментов осуществляется в пастообразной форме на краскотерках. Применяются два типа краскотерок — одновалковые и трехвалковые (рис. 3.16).

3.4.3. Прочее оборудование подготовительного производства

При переработке термореактивных пресс-материалов (порошкообразных и волокнистых) широко применяются таблеточные машины для предварительного таблетирования пластмасс.

Таблеточные машины по существу являются прессами-автоматами, специализирующимися на выпуске из термореактивных пресс-порошков заготовок (таблеток) определенного размера и массы. Переработка таблетированного пресс-порошка имеет ряд преимуществ: объемная или массовая дозировка заменяется более простой штучной; в связи с уплотнением материала и уменьшением воздушных включений повышается теплопроводность материала, что в свою очередь улучшает условия предва-

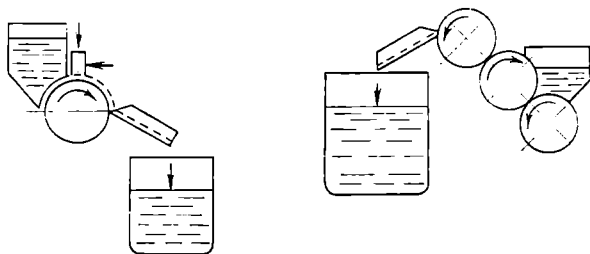


Рис. 3.16. Краскотерочные машины:

а — одновалковая; б — трехвалковая.

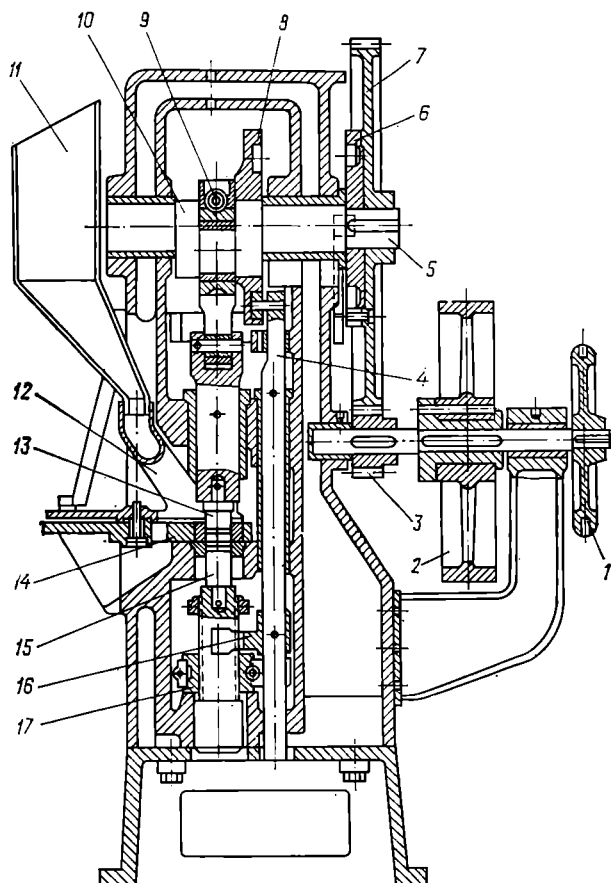


Рис. 3.17. Кривошипная таблеточная машина. Пояснения в тексте.

рительного подогрева; становится возможным высокотемпературный предварительный подогрев токами высокой частоты (ТВЧ); сокращаются размеры загрузочных камер пресс-форм, уменьшается пылеобразование. Все это позволяет снизить продолжительность цикла прессования, улучшить качество изделий и условия труда.

Технологический процесс таблетирования складывается из следующих этапов (переходов): дозирование, прессование, выталкивание, удаление готовой таблетки.

Обычно таблетирование осуществляется в цилиндрической матрице между пуансонами. В зависимости от того, к одному или к обоим пуансонам прикладывается усилие прессования, различают одностороннее и двухстороннее таблетирование. Таблеточные машины подразделяются на механические и гидрав-

личные. Механические таблеточные машины выпускаются двух типов: кривошипные и ротационные.

Кривошипная (эксцентриковая) таблеточная машина представляет собой автоматический однопозиционный пресс с приводом всех исполнительных механизмов от главного коленчатого вала.

Принцип действия кривошипной таблеточной машины показан на рис. 3.17. От электродвигателя через ременную передачу вращательное движение передается на шкив 2 и далее через зубчатые колеса 3 и 7 на главный вал 5. От главного вала, на котором имеется кривошип 10 и кулачки 6 и 8, приводятся в движение все исполнительные механизмы. При помощи кривошипно-шатунного механизма вращательное движение вала преобразовывается в возвратно-поступательное движение ползуна, в котором закреплен верхний прессующий пуансон 13. Нижний (выталкивающий) пуансон 15 во время таблетирования посредством промежуточных деталей опирается на корпус машины.

Возвратно-поступательное движение нижнего пуансона, необходимое для выталкивания таблетки, производится за счет кулачка 8, тяги 4 и вилки 16. Дозирование пресс-материала из неподвижного бункера 11 в матрицу 14 производится кулачком 6 и системой рычагов и роликов, при помощи которых питатель 12 поворачивается вокруг вертикальной оси на некоторый угол и засыпает пресс-порошок в матрицу. Своей нижней кромкой питатель скользит по рабочему столу таблеточной машины.

По окончании прессования верхний пуансон поднимается. В это время питатель поворачивается и останавливается над матрицей. Одновременно нижний пуансон опускается и матрица заполняется пресс-порошком.

Отпрессованная таблетка сталкивается в лоток внешней поверхностью питателя одновременно с дозировкой. Таким образом, за один поворот главного вала производится полный цикл таблетирования.

Объемное дозирование навески и его регулирование обеспечивается изменением положения нижнего пуансона за счет вращения опорной гайки 17 при помощи червячной передачи. Давление прессования зависит от длины рабочего хода прессующего пуансона. В описываемой конструкции давление регулируется при помощи эксцентрикового механизма в головке шатуна. Поворачивая при помощи червячной передачи 9 эксцентрик, можно изменять величину рабочего хода верхнего пуансона 13.

В процессе наладки может возникнуть необходимость вернуть машину вручную. Для этого используется маховик 1.

Ротационная таблеточная машина представляет собой многопозиционный пресс-автомат, в котором все технологические операции осуществляются в ходе непрерывного вращения ротора.

По окружности ротора на равном расстоянии друг от друга расположено несколько (от 4 до 50) комплектов пресс-инструмента* Каждый комплект состоит из матрицы и двух пуансонов, при этом оси пуансона параллельны оси вращения машины. Матрицы по отношению к ротору неподвижны. Пуансоны по мере вращения ротора совершают возвратно-поступательное движение, обеспечивающее необходимую последовательность операций таблетирования. Вертикальное перемещение пуансона осуществляется при помощи неподвижных цилиндрических кулачков-копиров, по которым скользят (или катятся) головки ползунов с закрепленными в них пуансонами. Ротационные таблеточные машины могут быть однократного и многократного действия. В машинах однократного действия длительность технологического цикла получения таблетки соответствует времени одного оборота ротора. В машинах многократного действия за один оборот ротора в каждом комплекте инструмента осуществляется i технологических циклов (где i — кратность действия). Многократность действия обеспечивается соответствующим профилем направляющих копиров, наличием нужного числа бункеров, питателей, приемных устройств и т. д.

В ротационных таблеточных машинах обычно осуществляется двухстороннее прессование таблеток, что достигается соответствующим профилированием копиров. Контакт между копиром и пуансоном обеспечивается за счет трения скольжения или качения. В ротационных таблеточных машинах широко применяются гидравлические, пневматические и пружинные компенсаторы давления.

Конструкцию ротационной таблеточной машины рассмотрим на примере 15-позиционной машины (рис. 3.18). Внутри литой станины 1 размещены зубчатый и червячный редукторы. Нижняя 2 и верхняя 10 неподвижные плиты связаны пятью колоннами 11, воспринимающими усилие, возникающее при прессовании. Червячный редуктор приводит в действие главный вал 12, вместе с которым вращается ротор 13. Пресс-порошок загружается в бункер 7, заслонка 6 служит для перекрытия подачи порошка в приемник 5, а заслонка 3 — для очистки бункера при переходе на другой порошок. В приемнике расположен ворошитель 4, вал которого 8 приводится во вращение от главного вала посредством зубчатой передачи 9.

Гидравлическая таблеточная машина представляет собой горизонтальный пресс-автомат, в котором осуществляется двухстороннее прессование в плавающей матрице (матрица не закреплена и может перемещаться по направляющим под действием сил трения).

Этим машинам присущи все достоинства гидравлических прессов: простота устройства, надежность конструкции, широкий диапазон регулирования параметров таблетирования, неза-

* Число позиций определяется технико-экономическими соображениями.

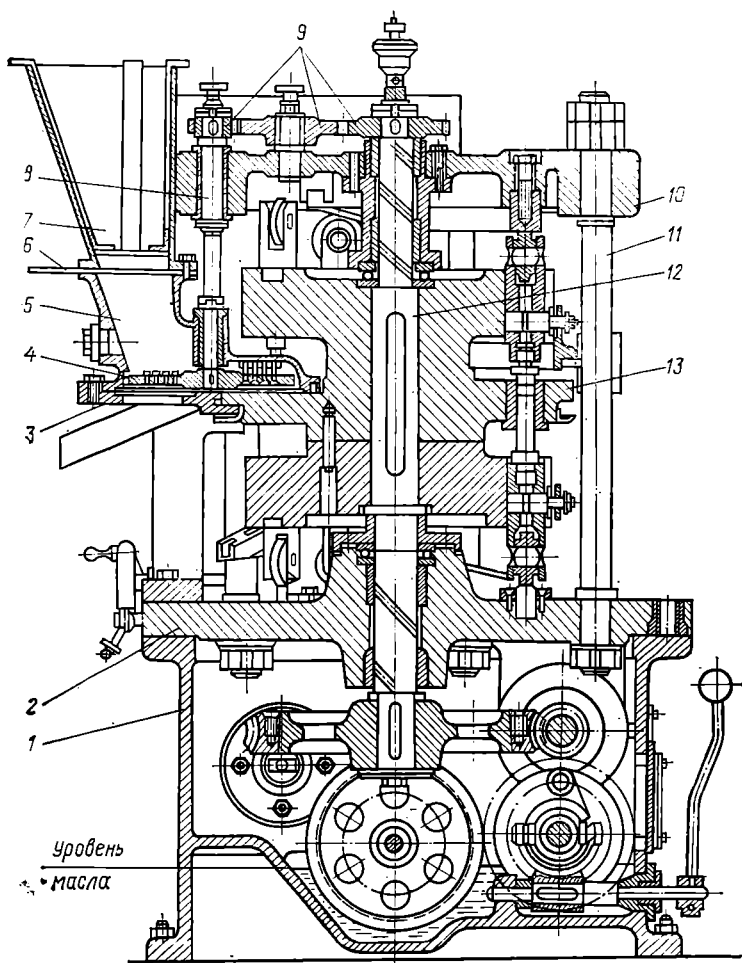


Рис. 3.18. Ротационная таблеточная машина. Пояснения в тексте.

висимость регулирования давления таблетирования от массы таблетки. Гидравлические таблеточные машины могут развивать значительные усилия прессования при относительно небольших габаритах. Поэтому они применяются для получения таблеток крупных размеров. В связи с тем, что усилие, необходимое для таблетирования порошкообразных материалов, резко увеличивается в конце цикла, в гидравлических таблеточных машинах используются насосы с переменным давлением или гидроагрегаты с мультипликатором давления.

Принципиальная пооперационная схема работы гидравлической таблеточной машины показана на рис. 3.19. Неподвиж-

ные плиты 1 и 7 связаны между собой колоннами (на рисунке не показаны). К плите 1 прикреплен неподвижный пуансон 5. Подвижный пуансон 6 закреплен на рабочем плунжере 8. Перемещение дифференциального рабочего плунжера обеспечивается подачей рабочей жидкости в главную или возвратную полость гидравлического цилиндра 9. Бункер 2 и матрица 4 закреплены в подвижной плите 3, которая при помощи тяги 14, поршня 13 и вспомогательного гидравлического цилиндра 12 может перемещаться по колоннам.

Работа машины складывается из последовательно повторяющихся операций (поз. I—VI). Поз. I является исходной. В поз. II подвижная плита находится в крайнем правом положении, при котором бункер останавливается над свободным пространством между пуансонами — происходит дозировка. Объем дозы может меняться при помощи винта 10, который ограничивает крайнее положение плунжера 8. Выбранное положение фиксируется контргайкой 11. Такое устройство требует надежного уплотнения винта от утечек масла. Иногда регулировка дозы обеспечивается за счет того, что путем перемещения по резьбе меняется длина неподвижного пуансона. В этом случае отпадает необходимость в дополни-

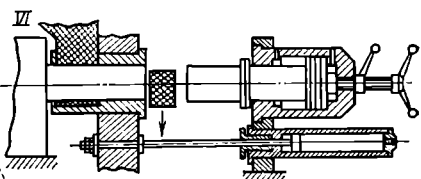
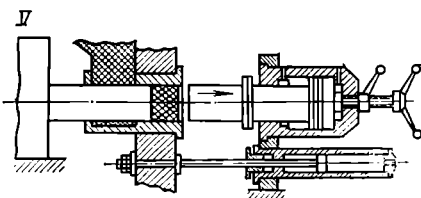
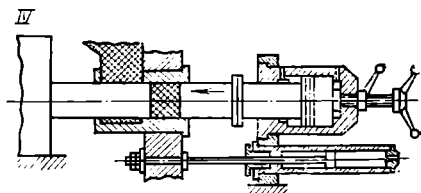
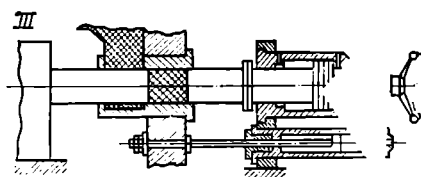
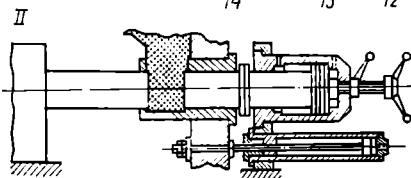
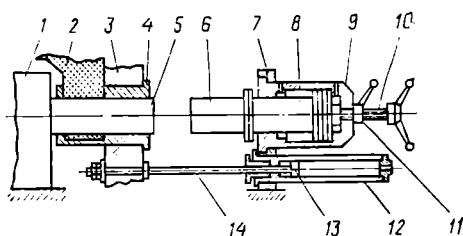


Рис. 3.19. Пооперационная схема гидравлической таблеточной машины. Пояснения в тексте.

тельных гидравлических уплотнениях. Однако возникает необходимость регулировки хода каретки.

Производить таблетирование при таком взаимном расположении прессующего инструмента, как показано на поз. II, нельзя, так как пресс-порошок будет выдавливаться в бункер. В поз. III подвижная плита перемещается в среднее положение, при этом доза пресс-порошка, предназначенная на изготовление таблетки, оказывается в замкнутом пространстве между матрицей и двумя пуансонами. На позиции IV показано прессование таблетки. В этой позиции и рабочая, и возвратная полости вспомогательных цилиндров соединяются со сливом. Силы трения пресс-порошка о матрицу, возникающие при прессовании, несколько смещают матрицу влево, при этом достигается эффект двухстороннего прессования в плавающей матрице. После окончания прессования подвижный пуансон отходит от спрессованной таблетки, боковое давление таблетки на матрицу уменьшается и начинается выталкивание таблетки (поз. V). Выталкивание осуществляется за счет перемещения подвижной плиты в крайнее левое положение. В поз. VI показано сбрасывание таблетки, оно происходит под действием собственного веса, однако на машине обычно имеется сбрасыватель, который может оторвать таблетку от пуансона в случае ее прилипания. Сброшенные таблетки по лотку скатываются в приемную емкость. Для получения мелких таблеток можно оборудовать машину многогнездным инструментом.

3.5. ДИСПЕРГИРОВАНИЕ В ПРОЦЕССАХ ПОЛУЧЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРОВ

3.5.1. Оценка получаемой смеси

В процессах переработки полимеров и получения композиционных полимерных материалов диспергированию подвергаются материалы самого различного типа в оборудовании самой разнообразной конструкции. Измельчению подвергаются материалы как хрупкие, так и высокоэластические. При начальном размере частиц исходных материалов от нескольких миллиметров до нескольких сотен миллиметров (отходы трубных производств) в результате измельчения требуется получение частиц с конечными размерами от нескольких микрометров до миллиметров.

При измельчении и диспергировании твердых тел и агломератов, когда под действием внешних сил тело делится на части с образованием новых поверхностей, важнейшими характеристиками измельчаемого материала являются форма и размер частиц, а самого процесса диспергирования — степень диспергирования (или измельчения). Для оценки получаемой смеси необходимо знать средний размер частиц диспергируемой фазы, а также дисперсию среднего размера частиц и объемного содержания диспергируемой фазы по объему смеси.

Информация о размерах частиц диспергируемой фазы обычно получается различными методами дисперсионного анализа, границы применимости которых следующие:

Метод анализа	Размеры частиц, м	Метод анализа	Размеры частиц, м
Ситовой	10^{-2} — 10^{-4}	Центрифугирования	10^{-6} — 10^{-8}
Седиментационный	10^{-4} — 10^{-6}	Ультрамикроскопии	10^{-7} — 10^{-9}
Кондуктометрический	10^{-4} — 10^{-6}	Нефелометрии	10^{-7} — 10^{-9}
Микроскопии	10^{-4} — 10^{-7}	Электронной микроскопии	10^{-7} — 10^{-9}
Фильтрования	10^{-8} — 10^{-7}		

Наиболее широко используется ситовой анализ и микроскопия образцов в виде пленок или микротомных срезов. Поскольку частицы имеют неправильную форму, применяют несколько показателей, которые определяют размеры частиц, например: средний по абсолютной величине размер, полученный по измерениям в нескольких направлениях; средний арифметический размер, равный стороне куба с такими же объемом и боковой поверхностью, как и у самой частицы; статистически средний размер по линии, делящей пополам площадь проекции частицы независимо от ориентации ее длинной стороны. В практике расчетов широко распространено измерение частиц диаметром d минимального круглого отверстия, через которое может пройти частица (при ситовом анализе).

На практике исходный материал и продукт дробления представляют собой смесь, состоящую из частиц размерами от $d_{\min}$ до $d_{\max}$. Обычно минимальный размер частиц принимают равным нулю, если это не вызывает затруднений при математическом описании процесса измельчения, или 0,1—1,0 мкм, так как измельчение на более мелкие частицы мало вероятно. Размер максимальной частицы принимают равным размеру ячейки сита, на котором не остается материала, или определяют по графикам зернового состава.

Кривые распределения размеров частиц могут быть с определенной степенью точности описаны различными уравнениями. Простейшим из них является уравнение

$$G_d = 1 - \exp(-Bd^m) \quad (3.29)$$

где G_d — интегральное содержание фракции с диаметром частиц меньше d ; B — константа, зависящая от свойств материала; m — константа, характеризующая рассеяние размеров.

Константу m можно найти как тангенс угла наклона прямой, построенной по зависимости

$$\ln \frac{1}{1 - G_d} = f(d)$$

Часто применяют уравнение нормального логарифмического распределения в виде

$$\Delta G_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \delta} \int_{\ln d_1}^{\ln d_2} \exp \left[- \left(\frac{\ln \frac{d}{d_{cp}}}{\sqrt{2} \ln \delta} \right)^2 \right] d \ln d \quad (3.30)$$

где ΔG_d — массовая доля частиц с размерами в интервале от d_1 до d_2 ; d_{cp} — среднее геометрическое размеров d_1 и d_2 частиц; δ — геометрическая стандартная девиация распределения.

Для двухмодального распределения

$$G_d = 0,5 + G_f \operatorname{erf} \left(\frac{\ln \frac{d}{d_{cp1}}}{\ln \delta_1} \right) + (1 - G_f) \operatorname{erf} \left(\frac{\ln \frac{d}{d_{cp2}}}{\ln \delta_2} \right) \quad (3.31)$$

где d_{cp1} и δ_1 — соответственно среднее геометрическое размеров частиц и геометрическая стандартная девиация распределения в области малых размеров частиц (вблизи пика); d_{cp2} и δ_2 — то же в области больших размеров частиц; G_f — масса фракции, для которой наблюдается переход из области малых в область больших размеров.

По данным распределения размеров частиц можно рассчитать характеристики зернового состава смеси. В качестве среднего диаметра частиц может быть взят среднечисловой, среднеобъемный и ряд других. На практике часто используют средневзвешенный размер $d_{св}$ продукта дробления:

$$d_{св} = \frac{\sum d_i x_i}{100}$$

где d_i — среднее арифметическое размеров частиц узкой фракции; x_i — выход узкой фракции.

При проведении ситового анализа размеры ячейки сита, суммарный остаток на котором равен 5% (d_5), в ряде случаев является более достоверным показателем, чем максимальный размер частиц d_{max} . Другими важными показателями являются: размер ячейки сита, остаток на котором равен 50% по массе (d_{50}); размер ячейки сита, суммарный остаток на котором равен $G(d_G)$, и суммарный остаток G_d на сите с размером ячейки, равным d .

Коэффициент неоднородности можно определить по выражению

$$V_e = d_e \sqrt{\frac{\sum n'}{2 \sum n' (d_e - d_i)^2}}$$

или

$$V_s = d_s \sqrt{\frac{\sum G_i}{2 \sum G_i (d_s - d_i)^2}}$$

где $d_c = \Sigma n' d_i / \Sigma n'$; $d_s = \Sigma n' d_i^3 / \Sigma n' d_i^2$; d_i — средний диаметр в каждом выбранном интервале диаметров; G_i — масса фракции данных размеров; n' — число частиц со средним диаметром d_i .

Результаты дробления материала в различных машинах для измельчения можно оценивать разными показателями. Основным из них является степень измельчения:

$$i = D_{св}/d_{св}$$

где $D_{св}$, $d_{св}$ — средневзвешенный размер частиц материала соответственно до и после проведения процесса измельчения.

Показатель $i' = D_{50}/d_{50}$ может быть использован для ориентировочных расчетов (D_{50} — размер ячеек сита, на котором остаток материала до измельчения равен 50% по массе).

Иногда в качестве показателя степени диспергирования применяется изменение удельной поверхности:

$$\Delta F_{уд} = (i - 1)/D_{св}$$

3.5.2. Механизм и основные показатели процесса диспергирования

При рассмотрении диспергирования обычно большое внимание уделяется кинетике процесса и его энергетическим характеристикам (энергозатратам).

Обычно ввиду сложности процесса пользуются графической зависимостью размеров частиц от времени проведения процесса (рис. 3.20). Приведенные данные для процесса разрушения стекловолокнистого наполнителя в процессе сдвига расплава в зазоре ротационного вискозиметра и переработки в экструзионном оборудовании являются типичными и позволяют выделить две характерные особенности процесса диспергирования. Во-первых, процесс разрушения имеет несколько периодов; переход от начального одномодального распределения к конечному одномодальному происходит через промежуточное бимодальное, для которого характерен широкий интервал размеров измельчаемого материала. Во-вторых, существует предельное минимальное значение размера частиц, получаемое в диспергирующих устройствах данной конструкции с заданной удельной мощностью, развиваемой в объеме диспергируемого материала. Поэтому кинетическое уравнение процесса диспергирования может быть записано не только в виде зависимости dG_d/dt (где G_d — содержание частиц крупнее предельного размера, до которого ведется измельчение) от факторов процесса и свойств материала; оно может быть также записано в виде

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{G_d - G_d^0}{G_d^0 - G_d^k} \right) = f(G_d, k, m) \quad (3.32)$$

где G_d^0 и G_d^k — начальное и конечное содержание фракций; k — коэффициент, зависящий от условий измельчения и свойств измельчаемого материала; m — коэффициент, зависящий от G_d .

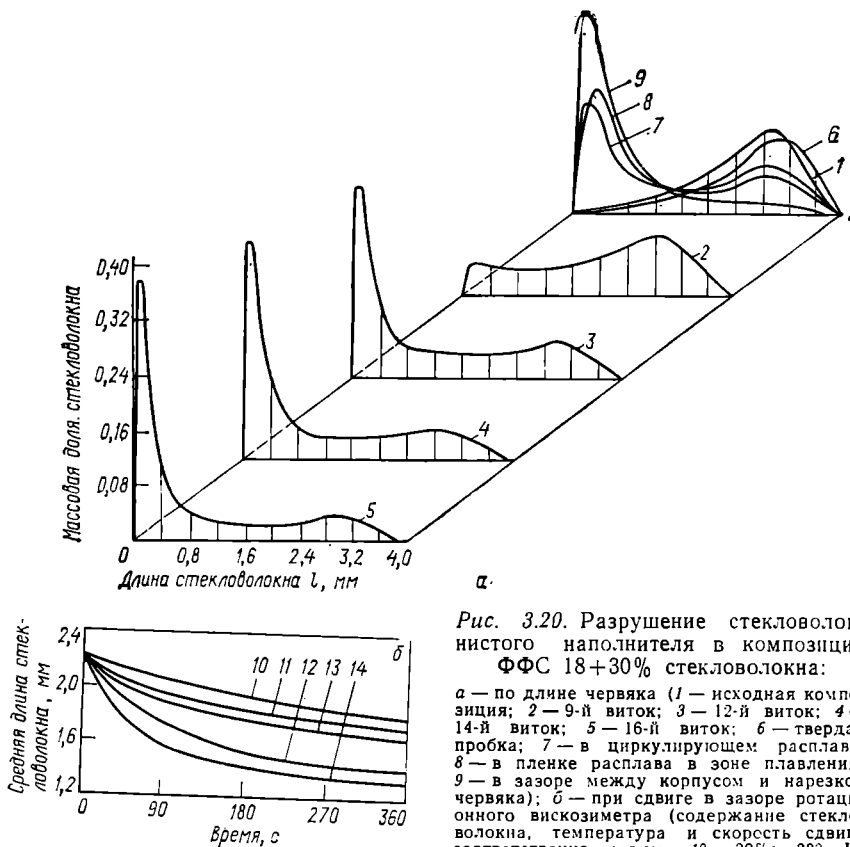


Рис. 3.20. Разрушение стекловолоконного наполнителя в композиции ФФС 18+30% стекловолокна:

а — по длине червяка (1 — исходная композиция; 2 — 9-й виток; 3 — 12-й виток; 4 — 14-й виток; 5 — 16-й виток; 6 — твердая пробка; 7 — в циркулирующем расплаве; 8 — в пленке расплава в зоне плавления; 9 — в зазоре между корпусом и нарезкой червяка); б — при сдвиге в зазоре ротационного вискозиметра (содержание стекловолокна, температура и скорость сдвига соответственно равны: 10 — 30%; 383 К; 7,6 с⁻¹; 11 — 30%; 373 К; 7,6 с⁻¹; 12 — 30%; 363 К; 7,6 с⁻¹; 13 — 60%; 373 К; 7,5 с⁻¹; 14 — 30%; 373 К; 30 с⁻¹).

Значения коэффициентов k и m и вид функции в каждом конкретном случае находятся экспериментально.

Способы оценки работы, необходимой для измельчения частиц с исходным размером D до частиц размером d , разрабатываются в ряде теорий, из которых «поверхностная» и «объемная» являются наиболее общими, не учитывающими вид процесса разрушения.

Согласно «поверхностной» теории, работа диспергирования затрачивается на преодоление сил молекулярного притяжения при образовании новой поверхности и пропорциональна площади вновь образующейся поверхности:

$$A = 6A_0D^2(i - 1) \quad (3.33)$$

где A_0 — работа, затрачиваемая на образование единицы поверхности.

По «объемной» теории, работа, необходимая для измельчения геометрически подобных тел одинакового состава, изменя-

ется пропорционально объемам или массам этих тел. Необходимое усилие измельчения пропорционально поверхностям измельчаемых тел или квадрату диаметра. Работа, отнесенная к единице поверхности $A_{уд}$, определяется формулой

$$A_{уд} = \frac{\sigma_p^2 D \lg i}{4E (i_0^{n_0} - 1) \lg a_0} \quad (3.34)$$

где $i_0 = \sqrt[3]{a_0}$; $n_0 = 3 \lg i / \lg i_0$; a_0 — объемная степень однократного разрушения; σ_p — разрушающее напряжение при растяжении; E — модуль упругости.

В ряде случаев оказывается возможным аналитический расчет потребляемой мощности и работы с учетом вида разрушения.

В устройствах ударного действия материал измельчается за счет создания ударных нагрузок при падении на материал измельчающих тел, при столкновениях частиц измельчаемого материала с измельчающими телами. Условием разрушения частицы является превышение кинетической энергии, переданной измельчаемому материалу, над работой однократного разрушения материала. В процессе ударного разрушения развиваются как упругая, так и пластическая деформации, однако ввиду кратковременности приложения нагрузки пластические деформации не развиваются до заметных величин, и разрушение носит хрупкий характер. Процесс разрушения определяется физико-механическими свойствами измельчаемого материала (твердостью, упругостью), размерами частиц, их формой и рядом других факторов. Критическая скорость удара, при которой происходит разрушение, может быть получена из решения контактной задачи Герца.

Интенсификация процесса может быть достигнута как увеличением скорости движения частиц, так и повышением хрупкости перерабатываемого материала за счет снижения его температуры. В первом случае применяется высокая частота вращения ротора молотковых дробилок (до 10 000 об/мин) или высокое давление газа (0,3—1,0 МПа) в струйных мельницах. Для охлаждения измельчаемого материала используется углекислый газ, жидкий азот и т. п. Все это позволяет получать порошки полимеров с размером частиц до 0,15—0,03 мм в роторных дробилках и до 0,075—0,045 мм (в отдельных случаях до 0,4—0,2 мкм) в струйных мельницах.

Для высокоэластических материалов (термопластов) обе теории (объемная и поверхностная) практически не применимы. Структура этих полимеров позволяет достаточно легко измельчать их за счет среза. Работа измельчения может быть рассчитана по напряжению среза с учетом его зависимости от скорости среза. Процессы разрушения за счет сдвига включают несколько стадий развития упругой деформации, которая сменяется пластической с последующим распространением сре-

Таблица 3.1. Характеристики диспергирующего оборудования

Тип оборудования	Вид измельчающего действия	Размеры частиц материала, мм		Производительность, т/ч	Расход энергии на 1 т продукта, МДж
		на входе	на выходе		
Валковые дробилки гладкими валками	с Сжатие	Толщина 6—70, длина не ограничена	6—16	3—150	2,6—3,36
Валковые дробилки рифлеными валками	с Сдвиг, удар, истирание	Толщина 70—400, длина не ограничена	50—100	5—1000	0,54—1,33
Ножевые дробилки	То же	Толщина до 200, длина не ограничена	1—15	0,02—3	$(1,87 \div 5,55) \cdot 10^3$
Стержневые мельницы	Истирание, удар	12—25	0,7—5	3—120	1,33—10,6
Шаровые мельницы	То же	0,6—25	0,075—0,8	0,5—75	26—54
Роторные дробилки	Удар	2—250	0,35—3	0,2—600	1,33—26
Молотковые дробилки	Удар, истирание	0,8—1000	0,45—50	0,05—400	2,6—530
Истирающе-раздавливающие дробилки	Истирание	10—25	0,075—0,9	0,2—5	40—530
Струйные мельницы	Удар, истирание	0,15—15	1×10^{-2} — 3×10^{-2}	0,1—10	—

за, сопровождающегося изгибом и разрывом материала. К сожалению, в настоящее время отсутствуют необходимые сведения о развитии контактных напряжений и характере разрушения полимерных материалов.

Характеристики различных типов диспергирующего оборудования, наиболее широко применяемых в промышленности пластмасс, приведены в табл. 3.1 [91].

Несколько другой характер носит процесс диспергирования ингредиентов в расплаве полимеров при получении наполненных композиционных материалов или их окрашивании. Обычно наполнитель в виде тонкоизмельченного порошка загружается в смесительное оборудование вместе с твердым полимером и в процессе его плавления и уплотнения образуются агломераты, диспергирование которых осуществляется за счет дальнейшего сдвигового воздействия на композицию. При этом происходит не только разрушение агломератов, но и перемешивание частиц агломерата с расплавом полимера. Процесс диспергирования таких агломератов наиболее интенсивен при содержании твердого наполнителя 30—70%.

Условия успешного проведения процесса диспергирования агломератов могут быть сформулированы с учетом следующего предположения [2]. Несмотря на различную природу сил, связывающих частицы в агломерате, эти силы могут характеризоваться величиной F и радиусом действия r^* , причем для упрощения расчета можно принять F постоянной в пределах r^* и пренебрежимо малой на больших расстояниях. Для достижения диспергирования необходимо не только вывести частицы из взаимного контакта, но и развести их на расстояние, большее r^* . При этом необходимо учитывать первоначальную ориентацию линии центров диспергируемых частиц относительно направления действия напряжения сдвига.

Проведенный Мак-Келви [2] анализ движения частиц показал, что только при напряжении сдвига выше некоторого предельного, характерного для данной системы, может происходить диспергирование частиц. Таким образом, для интенсификации процесса диспергирования агломератов необходимо создать в композиции высокие напряжения сдвига, а для создания благоприятной для деагломерации ориентации частиц необходимо периодическое изменение направления линий тока.

В оборудовании, используемом для проведения процессов диспергирования (экструдеры, закрытые смесители), для ин-

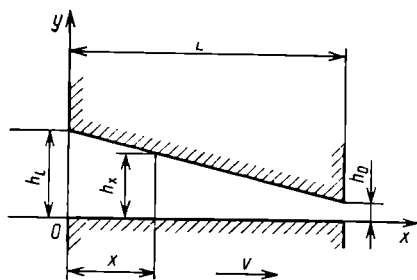


Рис. 3.21. К анализу процесса течения и диспергирования в зазоре между гребнем ротора и стенкой камеры.

тенсификации этих процессов часто используются диспергирующие элементы типа кулачков или лопастей различной формы; процесс диспергирования наиболее интенсивно проходит в зазоре между кромкой лопасти (кулачка) и стенкой камеры.

Анализ течения композиции, а следовательно, и условий диспергирования в зазоре, обычно выполняется путем «развешивания» стенки камеры (радиус кривизны камеры велик по сравнению с зазором) и расчета поля скоростей в расплаве между неподвижной лопастью и стенкой, движущейся со скоростью v , рис. 3.21 [86]. Для удобства анализа весь зазор может быть разбит на отдельные участки с постоянной глубиной канала или переменной глубиной h_x , меняющейся от начальной h_0 до конечной h_L на отрезке L . Для постоянного зазора напряжение сдвига на поверхности лопасти τ_{h_1} (для ньютоновской жидкости) равно

$$\tau_{h_1} = 2\eta Q/h_0^2 \quad (3.35)$$

где Q — расход расплава через зазор на единицу его длины; η — вязкость расплава в зазоре.

Для зазора линейно убывающей величины (при $h_L/h_0 \leq 2$)

$$\tau_{h_2} = \frac{2\eta Q}{h_0^2} \left(\frac{1}{1 - \frac{x}{2L}} \right) \quad (3.36)$$

Приведенное уравнение действительно лишь для $h_L/h_0 \leq 2$, так как при больших наклонах кромки лопасти возникают обратные потоки и зоны циркуляции, вследствие чего расчет значительно усложняется.

Мощность, приходящаяся на единицу длины лопасти в осевом направлении, в указанных случаях равна соответственно

$$P_1 = 4\eta Q^2 L/h_0^3; \quad P_2 = 15,5\eta Q^2 L/h_0^3 \quad (3.37)$$

Ввиду сложности гидродинамических процессов при диспергировании приведенные расчеты носят ориентировочный характер. Поэтому нередко пользуются моделированием диспергирующего оборудования с учетом принципиальных положений, изложенных выше.

3.5.3. Диспергирование волокнистого наполнителя при экструзии

В процессах получения и переработки композиционных материалов с волокнистым наполнителем наблюдается значительное разрушение волокон наполнителя (его диспергирование), причем уменьшение длины наполнителя резко ухудшает физико-механические свойства изделий. Очевидно, что в данном случае процесс диспергирования является крайне нежелательным и его требуется подавлять.

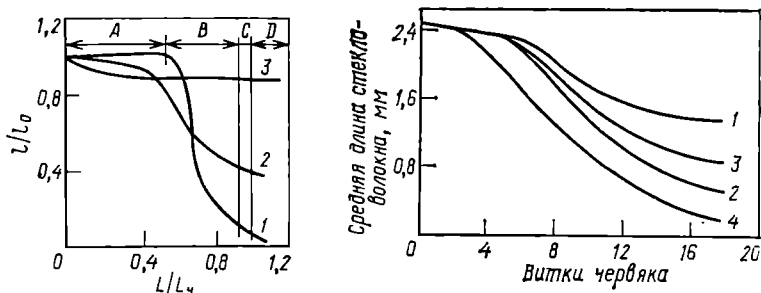


Рис. 3.22. Зависимость относительной длины волокон наполнителя l/l_0 от относительной длины червяка L/L_4 :

1 — при экструзии стекловолоконистой композиции; 2 — при литье под давлением стеклонаполненного найлона; 3 — при пластикации волокниста в вертикальном пластикаторе.

Рис. 3.23. Изменение средней длины волокна в стекловолоконистой композиции по мере продвижения ее в канале червяка. Давление в формующем инструменте:

1 — 0,5 МПа; 2 — 4,4; 3 — 5,4; 4 — 15 МПа.

Имеющиеся литературные данные [87—89] показывают, что характер разрушения волокнистого наполнителя в каждой функциональной зоне различен (рис. 3.22 и 3.23).

В зоне загрузки и транспортировки нерасплавленной композиции (область А на рис. 3.22), как правило, разрушение наполнителя незначительно (до 4—5%). Это объясняется тем, что здесь перерабатываемый материал (в виде гранул наполненной композиции или сухой смеси) не подвергается воздействию больших давлений и напряжений сдвига, так как давление в зоне транспортировки развивается достаточно медленно, и часто (особенно при переработке волокнистых сухосмешанных композиций) канал заполнен не полностью. Однако при переработке волокнистов (типа ДСВ-2-Р-2М и У2-301-07) наблюдается разрушение волокон наполнителя в зоне захвата материала за счет среза при набегании боковой поверхности червяка на переднюю стенку загрузочного отверстия (кривая 3 на рис. 3.23). Указанное явление отмечено при работе экструдеров как в вертикальном, так и в горизонтальном исполнении, при наличии и отсутствии продольных пазов в зоне загрузки, при принудительной загрузке композиции как питающим червяком, так и поршнем.

В зоне расплава (область С на рис. 3.22) диспергирование также невелико по нескольким причинам. Для композиций с большой длиной волокон — 10—15 мм (кривая 3) разрушение наполнителя не происходит вследствие пробкообразного характера движения расплава, когда отсутствуют сдвиговые деформации в «пробке». Разрушение имеет место лишь в тонком пристенном слое (где реализуются большие скорости сдвига), однако его вклад невелик. Для композиций с малой длиной наполнителя (до 2—3 мм) разрушение в зоне расплава также

невелико (но больше, чем в первом случае), так как в зоне расплава напряжения сдвига невелики вследствие высокой температуры, а сам наполнитель поступает в эту зону уже значительно разрушенным и для его дальнейшего разрушения требуются более высокие значения напряжений сдвига. Диспергирование волокон в зоне дозирования зависит от конструктивных особенностей оборудования, параметров экструзии и состава композиции. В целом диспергирование возрастает с увеличением частоты вращения червяка, степени наполнения композиции, давления в формующем инструменте, а также при уменьшении глубины канала червяка и зазора δ между наружной поверхностью нарезки червяка и внутренней поверхностью материального цилиндра (см. рис. 3.23).

Целесообразно выделить область расплава D , следующую непосредственно за окончанием нарезки червяка. В этой области в высоковязких волокнистых композициях происходит разрушение наполнителя за счет напряжений сдвига, возникающих в месте окончания нарезки червяка между материалом, находящимся в канале червяка и вращающимся вместе с ним, и материалом у входа в формующий инструмент, который не перемещается в окружном направлении (кривая 3 на рис. 3.22).

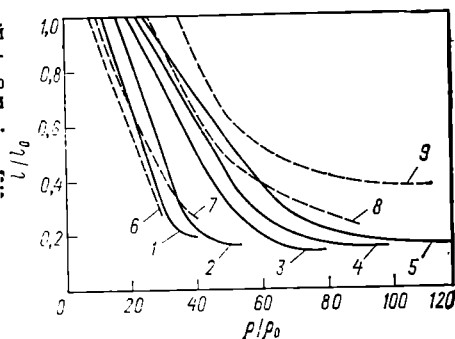
Наиболее значительное разрушение наполнителя происходит в зоне плавления полимера и его сжатия, где развиваются достаточно высокие давления (особенно вблизи частиц нерасплавленного полимера) и напряжения сдвига ввиду низкой температуры расплава, зона B (см. рис. 3.22, кривые 1 и 2). При этом необходимо рассмотреть отдельно процессы разрушения в каналах с малой и с большой степенью сжатия i (или с $i=1$). В первом случае в зоне плавления не развиваются такие большие давления, как во втором, что приводит к принципиально различным механизмам диспергирования наполнителя.

При экструзии наполненных волокнистых композиций при малой степени сжатия канала червяка отмечается постепенное увеличение содержания фракций волокнистого наполнителя с характерной длиной l^* . Для стеклонеполненных композиций величина l^* составляет 0,2—0,3 мм [87]. Характерно, что кривые распределения длины наполнителя являются двухмодальными, причем один из пиков лежит в области исходной длины наполнителя, а второй — в области l^* , что указывает на существенное преобладание одного, вполне определенного механизма разрушения наполнителя. Поскольку для наполненных композиций с наполнителем длиной 2—3 мм характерен пленочный режим плавления, а развивающиеся давления невелики, в нерасплавленной «пробке» наполнитель сохраняет исходную среднюю длину. В то же время в зоне циркуляции расплава и в пленке расплава между цилиндром и пробкой присутствует в больших количествах измельченный наполнитель с характерной длиной l^* . Поскольку разрушение в зоне циркуляции расплава незначительно (см. рис. 3.23), основной зоной разрушения яв-

Рис. 3.24. Зависимость относительной среднечисловой (1—5) и среднемассовой (6—9) длины стекловолокна l/l_0 от относительной плотности ρ/ρ_0 при сжатии стеклонаполненной композиции.

Начальная длина волокна:

1 — 0,4 мм; 2 — 0,56; 3 — 0,815; 4 — 0,92;
5 — 1,12; 6 — 0,565; 7 — 0,713; 8 — 1,05;
9 — 1,24 мм.



ляется пленка расплава на поверхности материального цилиндра.

Учитывая специфику свойств волокнистого наполнителя, а также сравнимость длины наполнителя с глубиной канала, можно считать, что его разрушение происходит за счет изгибающих напряжений, причем волокна могут рассматриваться как упругие гибкие стержни, закрепленные одним концом в пробке и выступающие в движущуюся пленку расплава. Влияние частиц наполнителя, находящегося в расплаве, может быть учтено введением в расчет вязкости расплава композиции, содержащей мелкоизмельченное волокно, вместо вязкости диспергирующей среды.

При переработке стеклонаполненных сухосмешанных композиций (обычно термопластичных) с использованием червяков с большой степенью сжатия, что вызвано необходимостью уплотнения композиций малых плотностей, в зоне сжатия и плавления развиваются высокие давления, и разрушение наполнителя происходит по механизму, отличному от изложенного выше. В работе [88] было показано, что разрушение стекловолокна в условиях сжатия может быть весьма значительным. Ввиду того, что наряду с разрушением волокна под действием давления происходит сильное уплотнение массы (причем оба процесса тесно связаны с изменением положения отдельных волокон), целесообразно рассмотреть относительное изменение длины разрушенного стекловолокнистого наполнителя l/l_0 в зависимости от изменения плотности массы ρ/ρ_0 (рис. 3.24). Как видно из рисунка, в процессе сжатия можно выделить три характерных участка.

В области малых давлений, а следовательно, малых значений ρ/ρ_0 разрушение наполнителя практически не происходит, и уплотнение массы осуществляется за счет изгиба волокон и их относительного перемещения. При дальнейшем увеличении давления наблюдается резкое уменьшение длины наполнителя, которое, как и увеличение плотности, связано с его разрушением за счет изгиба. Характер разрушения за счет изгиба подтверждается микроскопическими исследованиями поверхностей разрушения, которые оказываются типичными для изгиба.

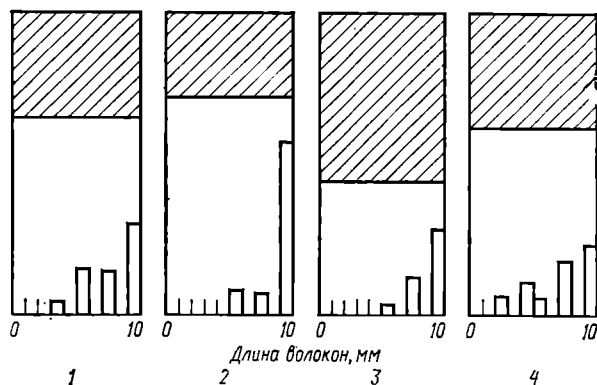


Рис. 3.25. Разрушение стекловолокнистого наполнителя пресс-материала ДСВ-2-Р-2М при течении в коническом канале с углом входа 115° при температуре 363 К и давлении 60 МПа. Диаметр входного отверстия: 1 — 3,5 мм; 2 — 5; 3 — 8; 4 — 10 мм.

В дальнейшем скорость разрушения замедляется, и при до-вольно значительном изменении плотности средняя длина наполнителя меняется слабо. В этой области разрушение идет в основном за счет контактных напряжений, что также подтверждается микроскопическими исследованиями продукта разрушения. Следует отметить значительное влияние начальной длины стекловолокна на интенсивность разрушения. В то же время в области больших давлений (около 20 МПа) средняя длина разрушенного стекловолокна не зависит от его начальной длины.

Дополнительное разрушение волокнистого наполнителя происходит также в формующем инструменте. Для случая стекловолокнистого наполнителя (волокнит типа ДСВ-2-Р-2М), в исходном состоянии представляющего собой стеклонити из большого числа (несколько сотен) стекловолокон, происходит как процесс уменьшения длины стеклонитей, так и их расщепление на отдельные волокна. Такой процесс удобно представлять графически в виде диаграмм [90], на которых заштрихованная площадь соответствует процентному содержанию стекловолокнистого наполнителя, разрушенного до элементарных стекловолокон, а незаштрихованная — содержанию наполнителя, сохранившего структуру нитей, но с длиной менее исходной. При этом распределение нитей по длине изображается соответствующей гистограммой (рис. 3.25).

Исследование разрушения стекловолокнистого наполнителя при течении в каналах различной формы показало, что его разрушение в каналах постоянного поперечного сечения незначительно вследствие пробкообразного характера течения. При течении в конических сужающихся каналах разрушение наполнителя велико. Оно усиливается с увеличением перепада дав-

ления в коническом канале и уменьшается с уменьшением величины угла при вершине конуса. Представленные на рис. 3.25 диаграммы показывают, что разрушение определяется и диаметром выходного отверстия конического канала. Меньшая степень разрушения в каналах малого диаметра объясняется тем, что к моменту входа расплава в капилляр наполнитель успевает ориентироваться в направлении течения расплава, и не подвергается воздействию изгибающего момента от действия касательных напряжений, как это имеет место в каналах большого диаметра.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют методики расчета степени разрушения волокнистого наполнителя в каналах с уменьшающимся поперечным сечением, и при анализе приходится использовать экспериментальные данные.

ГЛАВА 4

Экструзия термопластов

4.1. ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРОВ В ОДНОЧЕРВЯЧНЫХ ЭКСТРУДЕРАХ

4.1.1. Общая характеристика процесса

Процесс экструзии полимеров на одночервячных машинах — это процесс получения из исходного полимерного материала (в виде гранул, порошка или расплава) непрерывного изделия заданного поперечного сечения путем непрерывного продавливания через формующий инструмент.

Экструзией на одночервячных машинах могут быть переработаны практически все известные полимеры и их композиции. Получаемые изделия очень разнообразны: листы, пленки, трубы, непрерывные профильные изделия, оболочки для кабелей и т. д. Часто экструзионное оборудование входит в состав агрегатов в качестве пластикационных устройств. Производительность одночервячных экструдеров составляет от 3 до 20 000 кг/ч.

Основным рабочим органом одночервячного экструдера (рис. 4.1) является обогреваемый материальный цилиндр 1, внутри которого вращается червяк 2. Загрузка перерабатываемого материала производится с помощью загрузочного устройства 3, конструктивное оформление которого определяется состоянием и формой частиц перерабатываемого материала. Формующий инструмент 4 устанавливается на выходе из материального цилиндра 1, обогреваемого при помощи нагревателей 5. Привод червяка, закрепленного в опорном узле 6, осуществляется от электродвигателя 7 через редуктор 8 и муфту 9.

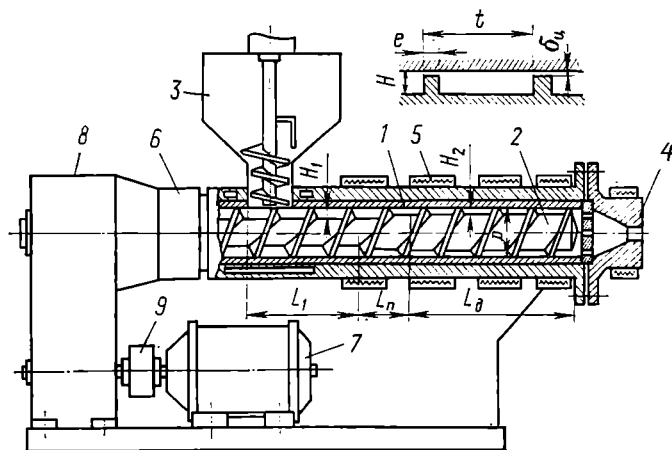


Рис. 4.1. Схема одночервячного экструдера (отдельно показано сечение канала червяка). Пояснения в тексте.

В процессе переработки исходный материал из загрузочно-го устройства поступает в червяк и перемещается в осевом направлении в винтовом канале червяка, образованном внутренней поверхностью материального цилиндра и нарезкой червяка. При движении материал уплотняется, расплавляется, происходит удаление воздуха и гомогенизация расплава, развивается давление, под действием которого подготовленный расплав продавливается через формующий инструмент. Соответственно в одночервячном экструдере в направлении движения материала могут быть выделены зоны: питания (загрузки), плавления (пластикации) и дозирования (выдавливания) длиной L_1 , L_n и L_d соответственно (см. рис. 4.1). В ряде случаев для экструдеров специального назначения могут быть выделены зоны дегазирования, смешения, диспергирования и т. д.

В зоне питания происходит прием перерабатываемого материала и его перемещение в направлении зоны плавления и уплотнения. Для повышения производительности зона загрузки выполняется с большим объемом винтового канала червяка, а также используются устройства для принудительной запитки экструдера.

В зоне плавления происходит расплавление полимера, его уплотнение и удаление воздушных включений. Для эффективного проведения указанных процессов канал червяка в зоне плавления выполняется с постепенно уменьшающимся объемом, что достигается в большинстве случаев уменьшением глубины канала H , шага винтовой линии t или обоих параметров.

В зоне дозирования происходит гомогенизация расплава и развивается давление, под действием которого расплав продавливается через формующий инструмент.

Червяки, диаметр D которых может быть от 20 до 500 мм и более, характеризуются геометрией (профилем) поперечного сечения канала, длиной нарезки, шагом t , степенью сжатия i и числом заходов нарезки.

Глубина винтового канала в зоне загрузки H_1 составляет $(0,12—0,16)D$ у машин для переработки пластмасс и $(0,17—0,25)D$ — для переработки резиновых смесей. Глубина канала в зоне дозирования H_2 определяется степенью сжатия червяка. Для червяков с постоянным шагом нарезки геометрическая степень сжатия $\xi = (D^2 - d_1^2) / (D^2 - d_2^2)$ (где d_1 и d_2 — диаметры сердечника и зон загрузки и дозирования) колеблется от 1 : 1,5 до 1 : 5. Толщина витка червяка составляет $(0,08—0,12)D$ для переработки пластмасс и $(0,06—0,08)D$ для переработки резиновых смесей; шаг винтовой линии — соответственно $(0,7—1,5)D$ и $(0,4—0,6)D$.

Длина функциональных зон экструдера может колебаться в значительных пределах в зависимости от свойств перерабатываемого материала и особенностей технологии переработки. В целом длина червяков составляет $(5—12)D$ для переработки резиновых смесей и $(15—35)D$ для переработки пластмасс.

Классификация одночервячных экструдеров может быть выполнена по ряду признаков. В зависимости от физического состояния загружаемого полимера экструдеры могут быть пластицирующими (запитка твердым полимером) или перерабатывающими расплав. В зависимости от числа стадий процесса экструдеры могут быть одноступенчатыми или двухступенчатыми. В зависимости от температурного режима процесса экструдеры могут быть универсальными или узкоспециализированными полнотропными. В универсальных экструдерах плавление и нагрев полимера происходит за счет тепла, подводимого извне, и тепла, генерируемого при сдвиге в самом расплаве. В специальных автогенных экструдерах все необходимое количество тепла генерируется в расплаве деформируемого полимера. Часто для создания требуемого температурного режима применяется охлаждение червяка.

Двухступенчатые экструдеры могут быть компаундирующими и вакуумирующими с зоной дегазации. Для улучшения качества смешения и диспергирования ингредиентов, а также улучшения температурной однородности расплава экструдеры могут снабжаться дополнительными смесительными и диспергирующими элементами. Особыми конструктивными особенностями отличаются экструдеры с осциллирующим червяком, совершающим периодические колебательные движения в осевом направлении. Существует множество модификаций конструктивного оформления экструдеров. Кроме диаметра червяка характерным параметром является отношение его длины к диаметру. Загрузка экструдера может быть свободной или принудительной. Сами червяки могут быть цилиндрическими и коническими по всей длине или только в зоне загрузки. И, наконец, экстр-

рудеры могут быть вертикального и горизонтального исполнения.

В большинстве случаев экструдеры входят в состав агрегатов для переработки полимеров (пленочные, трубные, листовальные и др.). В каждом конкретном случае к ним могут предъявляться специфические требования. Однако общим требованием является получение качественной продукции при минимальных затратах. Поэтому при расчете экструдеров большое внимание уделяется определению их производительности и потребляемой мощности в зависимости от параметров процесса переработки.

Для организации работы одночервячного экструдера необходимо правильное соотношение между независимыми объемами производительностями зоны загрузки Q_z , плавления Q_p и дозирования Q_d (это такие производительности, с которыми могли бы протекать процессы транспортировки материала, если бы они происходили независимо друг от друга). В случае, когда $Q_z < Q_d$ и $Q_p < Q_d$, экструдер работает в режиме «голодного питания» и не используются его возможности. В случае $Q_z \geq Q_p \geq Q_d$ наблюдается стабильность процесса экструзии и высокое качество экструдата. Однако если $Q_z \gg Q_p \gg Q_d$, зона дозирования оказывается перегруженной, что приводит к колебанию производительности и ухудшению качества экструдата. Следовательно, согласованность работы отдельных зон экструдера очень важна, в связи с чем целесообразно более подробно рассмотреть процессы, происходящие в каждой из указанных зон.

4.1.2. Анализ работы зоны загрузки

При анализе работы зоны загрузки одночервячных экструдеров необходимо рассмотреть вопросы, связанные с конструктивным исполнением этой зоны, ее производительностью и развиваемым давлением.

Надежность работы зоны загрузки определяется степенью заполнения канала червяка, а также характером движения материала. Очевидно, что оба фактора зависят от свойств перерабатываемого материала и конструктивного исполнения зоны загрузки и загрузочного отверстия. В дальнейшем рассмотрение зоны загрузки червяка проведем на примерах переработки гранулированных и волокнонаполненных материалов.

Наиболее простое конструктивное оформление зоны загрузки — это гладкий материальный цилиндр с загрузочным отверстием круглого или прямоугольного сечения (рис. 4.2, а). В таких системах предполагается свободное истечение гранулированного или порошкообразного материала из загрузочной воронки в канал червяка. Для лучшего захвата материала червяком последний должен иметь коэффициент трения меньший, чем материальный цилиндр. Глубина канала выбирается максимально возможной, исходя из условий прочности червяка. В за-

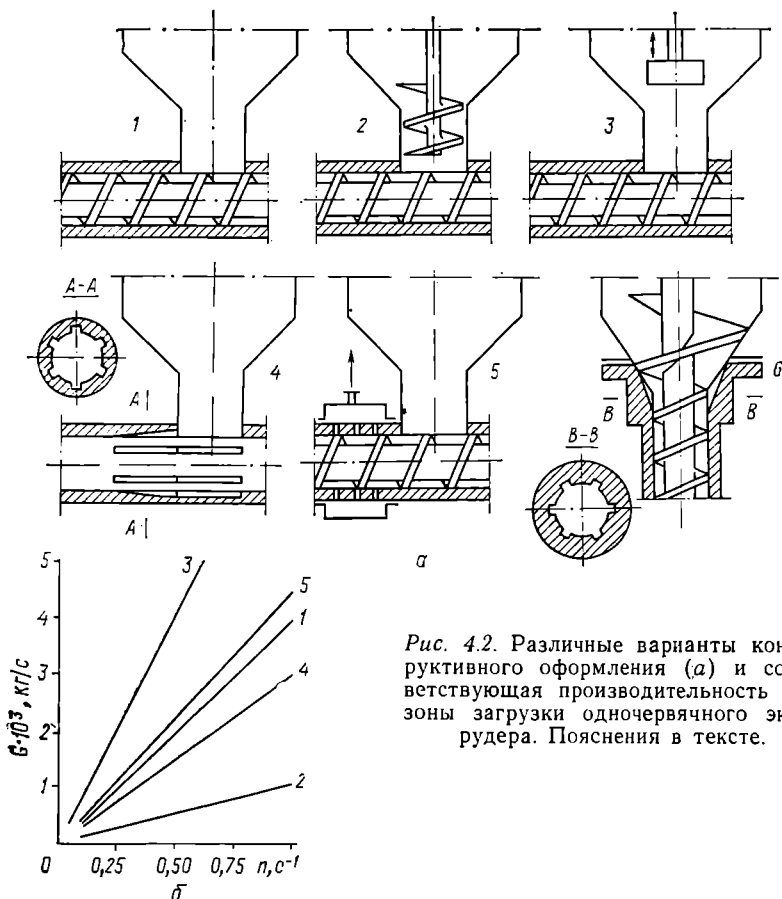


Рис. 4.2. Различные варианты конструктивного оформления (а) и соответствующая производительность (б) зоны загрузки одночервячного экструдера. Пояснения в тексте.

висимости от коэффициента трения перерабатываемого полимера существует оптимальный угол подъема винтовой линии нарезки червяка в зоне загрузки. Однако на практике это учитывается редко, и червяк выполняют с шагом, равным диаметру по всей длине, что упрощает технологию изготовления червяка.

Большое влияние на производительность зоны загрузки оказывает конфигурация загрузочного окна и его ориентация относительно оси червяка [96], которые определяют скорость заполнения гранулированным материалом межвиткового пространства в зоне загрузки. Наибольшая производительность достигается при прямоугольном загрузочном отверстии, расположенном под углом к оси экструдера, равным углу подъема винтовой линии.

Улучшение условий загрузки может быть обеспечено применением принудительной подачи материала в канал червяка с помощью вспомогательного червячного питателя 2 (рис. 4.2, а)

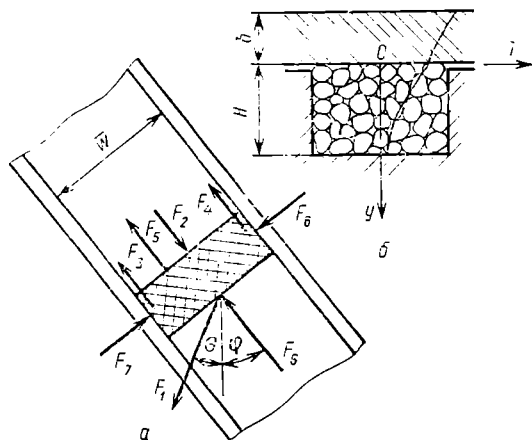
или поршневого загрузочного устройства 3. Однако в этом случае необходимо согласовывать работу запиточных устройств с работой зоны загрузки, так как в случае превышения производительности питателя над независимой производительностью зоны загрузки возникают высокие давления в загрузочном окне, резкое увеличение плотности перерабатываемой массы и потребляемой мощности. В ряде случаев чрезмерное уплотнение массы может приводить даже к уменьшению производительности зоны загрузки [26], что вызвано уменьшением подвижности образующейся пробки и меньшим заполнением канала червяка.

Значительное увеличение производительности зоны загрузки достигается применением пазов переменной глубины (уменьшающейся в направлении перемещения материала) под загрузочной воронкой и в зоне транспортировки нерасплавленных гранул 4 (см. рис. 4.2, а). Увеличение производительности обуславливается тем, что пазы препятствуют перемещению гранул в окружающем направлении, и материал перемещается относительно цилиндра только в направлении оси экструдера [94]. При прочих равных условиях максимальная производительность достигается при использовании прямоугольных пазов, причем высота пазов и их число (если их больше трех) практически не влияют на производительность. Характерной особенностью описываемой конструкции зоны загрузки является исключительная «жесткость» характеристики экструдера: ее производительность практически не зависит от сопротивления на выходе из зоны загрузки.

Для загрузки материалов, имеющих весьма малую подвижность (волокниты, пропитанное рубленое стекловолокно), часто применяется зона загрузки с вакуумным отсосом. Это позволяет не только осуществить загрузку экструдера, но и произвести предварительное уплотнение материала в канале червяка 5 (см. рис. 4.2, а). Повышенную производительность (до двух раз) по сравнению с экструдерами горизонтального исполнения имеют экструдеры вертикального исполнения 6. Это объясняется лучшими условиями заполнения канала червяка. Применение же в таких экструдерах конической заходной части в сочетании с продольными пазами на материальном цилиндре позволяет перерабатывать различные волокниты с производительностью, сравнимой с той, которая достигается при переработке гранулированных материалов.

Зависимость производительности зоны загрузки от частоты вращения червяка для вариантов конструктивного оформления 1—5 (см. рис. 4.2, а) приведена на рис. 4.2, б. Видно, что в довольно большом диапазоне частот вращения эта зависимость линейна. Только при больших частотах при свободной подаче гранул полимера наблюдается некоторое уменьшение темпа роста производительности с увеличением частот, что связано с отрицательным действием центробежных сил [106].

Рис. 4.3. Силы, действующие на материал в канале червяка (а), и распределение температуры по высоте слоя полимера (б).
Пояснения в тексте.



Для определения производительности зоны загрузки рассмотрим упрощенную плоско-параллельную модель (рис. 4.3), согласно которой плоская пластина развертки цилиндра движется над разверткой канала

червяка под углом φ к его продольной оси со скоростью V . Вследствие перемещения пробки материала вдоль канала червяка с относительной скоростью $V_{м/ч}$, как видно из картины скоростей, скорость перемещения пробки относительно цилиндра $V_{м/ц}$ должна иметь направление под углом θ к направлению движения развертки цилиндра. При этом

$$V_{м/ч} = V \frac{\sin \theta}{\sin (\theta + \varphi)} \quad (4.1)$$

а объемная производительность зоны питания

$$Q_3 = V_{м/ч} w H_1 = \pi^2 N H_1 D^2 \frac{\sin \theta \sin \varphi}{\sin (\theta + \varphi)} \frac{1 - e}{\pi D \operatorname{tg} \varphi} = 2 \alpha_1 N \frac{\sin \theta}{\sin (\theta + \varphi)} \quad (4.2)$$

где w — ширина канала; H_1 — глубина канала в зоне загрузки; φ — угол подъема винтовой линии; e — ширина гребня нарезки.

Величина угла θ может быть получена из распределения давления по длине зоны питания. Рассмотрим силы, действующие на элемент пробки (см. рис. 4.3) [94], с учетом неизотропности поля давлений p (введем коэффициенты $k_{ц}$, $k_{ч}$ и $k_{с}$):

$$p_{ц} = p k_{ц} \quad p_{ч} = p k_{ч} \quad p_{с} = p k_{с} \quad (4.3)$$

где $p_{ц}$, $p_{ч}$, $p_{с}$ — давления, действующие соответственно на цилиндр, червяк и стенки канала червяка.

Теперь можно определить следующие компоненты сил:

F_1 — сила трения материала о цилиндр, действующая в направлении, обратном вектору скорости движения пробки относительно цилиндра

$$F_1 = p k_{ц} f_u \bar{w} dz$$

F_2, F_6 — силы давления на материал

$$F_2 = p H_1 \bar{w}; \quad F_6 = (p + dp) \bar{w} (H_1 - \chi dz)$$

(где χ — коэффициент, характеризующий изменение высоты нарезки червяка; $\bar{w}$ — средняя ширина канала червяка);

F_7, F_8 — нормальные силы, действующие со стороны стенок канала на пробку

$$F_7 = F_8 + F^*; \quad F_8 = p k_c H_1 dz$$

(где F^* — уравнивающая сила);

F_5 — сила трения, действующая со стороны дна винтового канала

$$F_5 = p k_{\psi} f_{\psi} \omega_{\psi} dz \cos(\arctg \chi) \approx p k_{\psi} f_{\psi} \omega_{\psi} dz$$

(где $\bar{\omega}_{\psi}$ — ширина канала у сердечника червяка);

F_3 — сила трения, действующая на пробку со стороны толкающей стенки червяка

$$F_3 = (p_c H_1 dz + F^*) f_{\psi}$$

F_4 — сила трения, действующая на пробку со стороны передней стенки канала

$$F_4 = p_c H_1 dz f_{\psi}$$

Из условия равновесия проекций всех сил на ось червяка и моментов относительно оси, исключая величину F^* и интегрируя уравнение в пределах изменения давления на участке длиной dz от p_1 до p_2 , получаем:

$$p_2 = p_1 \int_{z_1}^{z_2} \exp \frac{B_1 - A_1 k}{A_2 k + B_2} dz \quad (4.4)$$

где

$$A_1 = \bar{\omega} f_{\psi} k_{\psi} \sin \theta - \bar{\omega} \chi \sin \varphi + 2 H_1 k_c f_{\psi} \sin \varphi + \omega_{\psi} f_{\psi} k_{\psi} \sin \varphi (1 + \chi / f_{\psi})$$

$$A_2 = H_1 \bar{\omega} \sin \varphi$$

$$B_1 = \bar{\omega} f_{\psi} k_{\psi} \cos \theta + \bar{\omega} \chi \frac{\bar{D}}{D} \cos \varphi - 2 H_1 k_c f_{\psi} \sin \varphi -$$

$$- 2 H_1 k_c f_{\psi} \frac{\bar{D}}{D} \cos \varphi - \omega_{\psi} k_{\psi} f_{\psi} \left(1 + \frac{\chi}{f_{\psi}} \right) \frac{D_{\psi}}{D} \cos \varphi$$

$$B_2 = \bar{\omega} H_1 \frac{\bar{D}}{D} \cos \varphi; \quad k = \frac{\bar{D}}{D} \frac{\sin \varphi + f_{\psi} \cos \varphi}{\cos \varphi - f_{\psi} \sin \varphi}; \quad D_{\psi} = D - 2 H_1$$

Величина угла θ может быть найдена из уравнения (4.2) как функция перепада давления вдоль пробки. Для случая канала постоянного поперечного сечения и изотропного поля давлений может быть получено упрощенное выражение для определения θ в форме [94]:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & k \sin \theta + c (k \sin \varphi_{\psi} + c \cos \varphi_{\psi}) + \frac{2 H_1}{l} (k \operatorname{ctg} \varphi_{\psi} + B^2) + \\ & + \frac{H_1 B}{L_1 f_{\psi}} \sin \varphi_{\psi} (B \cos \varphi_{\psi} + k \sin \varphi_{\psi}) \ln \frac{p_2}{p_1} \end{aligned} \quad (4.5)$$

где $k = B (\operatorname{tg} \varphi_{\psi} + f_{\psi}) / (1 - f_{\psi} \operatorname{tg} \varphi_{\psi})$; $c = (D - 2 H_1) / D$; $B = (D - H_1) / D$; L_1 — длина зоны питания; $\varphi_{\psi}, \varphi_{\psi}$ — углы подъема винтовой линии у сердечника червяка и на половине глубины винтового канала.

Из приведенных уравнений очевидно, что величина давления в зоне питания определяется длиной зоны и соотношением коэффициентов трения пробки о цилиндр и червяк. При $f_{\text{ч}} \ll \ll f_{\text{ц}}$ достигается максимальная производительность, при $\theta = 0$ движение пробки прекращается. Увеличение производительности зоны загрузки может быть достигнуто повышением коэффициента трения пробки о внутреннюю поверхность цилиндра и уменьшением $f_{\text{ч}}$. Это может быть получено как подбором температурного режима переработки (с учетом зависимости коэффициента трения от температуры), так и рядом конструктивных приемов: высокая чистота поверхности червяка, наличие продольных пазов на внутренней поверхности материального цилиндра, выбор угла подъема винтовой линии в зоне загрузки и другие.

В процессе движения пробки вследствие его трения о червяк и материальный цилиндр, температура которого увеличивается по мере удаления от охлаждаемой зоны загрузки, происходит ее нагрев, главным образом вследствие трения о поверхность цилиндра [93], при котором мощность тепловыделений составляет:

$$dP_{\text{ц}} = V_{\text{п}} \rho f_{\text{ц}} \omega dz = \pi N D \frac{\sin \varphi}{\sin(\theta + \varphi)} f_{\text{ц}} \omega p dz \quad (4.6)$$

Поскольку теплоотвод осуществляется в цилиндр и в пробку пранул, суммарный тепловой поток равен

$$q = -k_{\text{п}} \left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0} + k_{\text{ц}} \left(\frac{dT_{\text{ц}}}{dy} \right)_{y=0} \quad (4.7)$$

где $k_{\text{п}}$ и $k_{\text{ц}}$ — коэффициенты теплопроводности материала пробки и цилиндра.

Считая распределение температуры в стенке цилиндра толщиной b линейным, вследствие чего удельный тепловой поток выразится уравнением

$$q(t) = \rho f_{\text{ц}} \pi N D \frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi + \theta)} - \frac{k_{\text{ц}}}{b} [T_{\text{п}}(0, t) - T_{\text{ц}}(b, t)] \quad (4.8)$$

а также пренебрегая теплоотдачей через витки и сердечник червяка, решение уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

при граничных условиях второго рода можно получить в виде [94]:

$$T(y, t) = T_0 + \frac{a^{0,5}}{k_{\text{п}} \pi^{0,5}} \int_0^t \frac{q(t-t^*) \exp\left(-\frac{y^2}{4at^*}\right) dt^*}{(t^*)^{0,5}} \quad (4.9)$$

Заменяя в уравнении (4.8) t на $(t-t^*)$, переходя от временной координаты к пространственной z , равной

$$z = \frac{t\pi ND \sin \theta}{\sin(\theta + \varphi)} \quad (4.10)$$

уравнение (4.9) можно представить в следующем виде, удобном для интегрирования численным методом:

$$T_{i+1}(0; z) = T_i + \frac{a^{0,5}}{k_n \pi^{0,5}} \left[\frac{\sin(\varphi + \theta)}{\pi ND \sin \theta} \right]^{0,5} \left\{ \frac{\pi ND \sin \varphi}{\sin(\theta + \varphi)} f_u(z) p_i(z) + \right. \\ \left. + \frac{k_u}{b} [T_u(b; z) - T_n(0; z)] \right\} \sqrt{\Delta z} \quad (4.11)$$

Величины давления $p_i(z)$ и коэффициентов трения пробки по материальному цилиндру $f_u(z)$ должны приниматься с учетом их температурной зависимости.

4.1.3. Описание процессов, протекающих в зоне плавления

При движении пробки материала вдоль канала червяка отдельные частицы пробки достигают температуры плавления вследствие неравномерного распределения температуры и давления. В результате происходит качественное изменение характера движения перерабатываемого материала, начинается процесс плавления.

В зависимости от условий процесса переработки, свойств материала, относительной подвижности частиц в пробке могут наблюдаться несколько механизмов движения и плавления полимера в зоне плавления. Если в пробке образуется жесткий каркас, как это происходит при переработке сильно наполненных композиционных материалов, то движение материала продолжается в пробковом режиме, несмотря на образование тонкого слоя расплавленного полимера на поверхности цилиндра. Для переработки чистых полимеров в большинстве случаев характерен так называемый пленочный механизм плавления, подробно исследованный в работах Тадмора [92, 93, 95].

Согласно пленочному механизму, плавление начинается в месте контакта полимера с поверхностью цилиндра, имеющего температуру, равную температуре плавления полимера. Толщина образующейся пленки расплава возрастает; когда она превысит величину зазора между нарезкой червяка и цилиндром, передняя стенка канала червяка начинает соскребать пленку расплава, вследствие чего образуется скопление расплава у толкающей стенки канала, а ширина пробки гранул уменьшается. Процесс плавления завершается, когда ширина пробки уменьшается до нуля. Хотя процесс плавления гранулированного материала начинается на поверхности контакта его с горячей внутренней стенкой корпуса (там, где температура стенки равна температуре плавления полимера), однако место

образования пленки расплава несколько смещено в сторону выхода относительно точки цилиндра, имеющей температуру, равную температуре плавления полимера, за которую может быть принята температура резкого уменьшения вязкости.

Первоначально образующийся расплав заполняет часть пор между гранулами, затем наблюдается рост толщины пленки расплава. После того, как ее толщина превысит величину радиального зазора $\delta_{\text{ц}}$, начинается накопление расплава у толкающей стенки нарезки червяка.

Таким образом, целесообразно выделить так называемую «зону задержки плавления», которая начинается в точке, где температура поверхности полимерной пробки достигает температуры плавления, а заканчивается в сечении материального цилиндра, где толщина пленки возрастает в несколько раз по сравнению с толщиной зазора и развивается перепад давления, необходимый для накопления твердой фазы у тыльной стороны нарезки червяка. Длина зоны задержки плавления определяется временем завершения процесса образования пленки расплава и должна быть обратно пропорциональна скорости плавления. Толщина пленки, при которой начинает действовать пленочный механизм плавления, зависит от деформативных характеристик слоя твердого полимера и может быть в 4—5 раз больше радиального зазора. В целом зона задержки плавления может достигать 20% общей длины зоны плавления.

Расплавление твердых частиц происходит главным образом за счет тепла, переносимого через пленку расплава. Поэтому сопротивление теплообмену сосредоточено в тонкой пленке у поверхности цилиндра.

Для пленки расплава, подчиняющегося степенному реологическому закону вида

$$\tau = m_0 e^{a^* (T - T_{\text{пл}})} \dot{\gamma}^n \quad (4.12)$$

распределения скоростей v_j и температуры T по координате $\xi = y/\delta$ записывается в виде

$$\frac{v_j}{V_j} = \frac{1 - \exp(-A_4 \xi)}{1 - \exp(-A_4)} \quad (4.13)$$

$$\frac{T - T_{\text{пл}}}{T_{\text{ц}} - T_{\text{пл}}} = \xi + \frac{K_3 \{1 - \exp(-A_4 \xi) - \xi [1 - \exp(-A_4)]\}}{k_p m A_4^2 (T_{\text{ц}} - T_{\text{пл}})} \quad (4.14)$$

где V_j — векторная разность скоростей поверхности цилиндра и твердой фазы;

$$A_4 = \frac{a^* (T_{\text{ц}} - T_{\text{пл}})}{n}; \quad K_3 = m_0 \delta^2 \left\{ \frac{A_4 V_j}{[1 - \exp(-A_4)] \delta} \right\}^{n+1};$$

k_p — теплопроводность расплава; n , m_0 , a^* — константы реологического уравнения.

Образование пленки начальной толщиной δ_1 (около 0,02 см) происходит на некотором расстоянии z_1 от начала зоны задерж-

ки плавления, где заканчивается процесс заполнения пустот между отдельными гранулами на глубину до половины их диаметра [92]:

$$z_1 = \frac{1,3R^{3/2}\rho_n V_{sz} A_4 [1 - \exp(-A_4)]}{\rho_p V_j \sqrt{K^* \{A_4 - [1 - \exp(-A_4)]\}}} \quad (4.15)$$

где R — радиус гранулы;

$$K^* = \frac{\frac{\pi k_p (T_u - T_p) A_4 [1 - \exp(-A_4)]}{V_j \{A_4 - [1 - \exp(-A_4)]\}} + \frac{\eta A_4 V_j}{1 - \exp(-A_4)}}{2\rho_p [\lambda + c_{pp} (T_p - T_w)]}$$

η — кажущаяся вязкость пленки расплава; ρ_n и ρ_p — плотность пробки и расплава; c_{pp} — теплоемкость расплава; V_{sz} — скорость пробки в направлении оси канала червяка.

При этом толщина

$$\delta_1^2 = K^* \frac{\sqrt{320}}{21} R \quad (4.16)$$

Уменьшение запаздывания плавления может быть достигнуто созданием соответствующих профилей температуры по длине цилиндра, созданием минимального зазора в этой зоне, а также путем предварительного подогрева полимера.

В дальнейшем действует пленочный механизм плавления. В этой зоне тепло передается от стенки нагретого цилиндра через пленку расплава к поверхности раздела расплава и твердой фазы полимера, а также генерируются в самой пленке за счет вязкого трения. При этом толщина пленки расплава возрастает.

Для расчета зоны плавления, ее длины, скорости плавления полимера в ряде работ [92, 94] рассматривается течение рас-

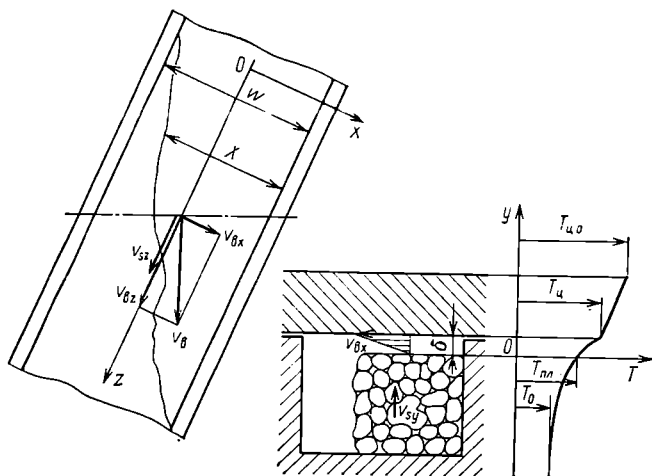


Рис. 4.4. К расчету длины зоны плавления; распределение температуры в полимере. Пояснения в тексте.

плава полимера между двумя бесконечными пластинами, одна из которых — внутренняя поверхность развертки корпуса, а вторая — поверхность раздела фаз между расплавом и пробкой, имеющая температуру, равную температуре плавления полимера $T_{пл}$ (рис. 4.4). Первая пластина имеет температуру $T_{ц}$ и движется со скоростью $V_{ц}$; вторая — температуру $T_{пл}$ и скорость движения вдоль канала червяка V_{sz} .

Считая пробку гомогенной, непрерывной, бесконечной толщины, а также границу расплава и гранул четко выраженной, Тадмор [95] для случая установившегося движения расплава псевдопластичной жидкости при граничных условиях

$$y = 0 \quad T = T_{пл}; \quad y = \delta \quad T = T_{ц}$$

получил следующее распределение температуры в расплаве и в твердой пробке соответственно:

$$\frac{T - T_{пл}}{T_{ц} - T_{пл}} = \frac{\eta (\Delta V_{ц})^2}{2k_p (T_{ц} - T_{пл})} \frac{y}{\delta} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right) + \frac{y}{\delta} \quad (4.17)$$

$$\frac{T - T_0}{T_{пл} - T_0} = \exp \frac{V_{sy} y}{a} \quad (4.18)$$

где $\Delta V_{ц} = |\vec{V}_{ц} - \vec{V}_{пр}| = [(V_{bz} - V_{sz})^2 + V_{bx}^2]^{1/2}$; δ — толщина слоя расплава, зависящая от z ; T_0 — температура середины пробки; V_{sz} , V_{sy} — проекции скорости движения пробки на оси z и y ; a — коэффициент температуропроводности нерасплавленного материала; V_{bz} , V_{bx} — проекции скорости движения цилиндра на оси z и x ; k_p — коэффициент теплопроводности расплава.

При этом разность теплового потока от расплава к поверхности раздела

$$-q_{fy} \Big|_{y=0} = k_p \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{k_p}{\delta} (T_{ц} - T_{пл}) + \frac{\eta (\Delta V_{ц})^2}{2\delta} \quad (4.19)$$

и теплового потока от поверхности раздела к внутренним областям пробки

$$-q_{sy} \Big|_{y=0} = k_n \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}$$

дает количество тепла $q_{пл}$, расходуемое на плавление полимера на единице поверхности раздела. Следовательно

$$V_{sy} \rho_n \lambda = \frac{k_p}{\delta} (T_{ц} - T_{пл}) + \frac{\eta (\Delta V_{ц})^2}{2\delta} - \rho_n c_{рп} (T_{пл} - T_0) V_{sy} \quad (4.20)$$

где k_p , k_n — коэффициенты теплопроводности расплава и гранул в пробке соответственно; λ — теплота плавления материала; η — эффективная вязкость расплава полимера; ρ_n и $c_{рп}$ — плотность и теплоемкость пробки.

Рассмотрим продольное сечение канала единичной длины плоскостью нормальной оси x , которая направлена по ширине винтового канала. Для такого сечения количество материала, проходящего через поверхность раздела фаз со стороны нерасплавленной пробки, должно быть равно объемному расходу в

жидком слое, причем указанные значения расходов должны быть равны скорости плавления на единичной длине канала:

$$\frac{V_{bz} + V_{sz}}{2} \rho_p \frac{d(X\delta)}{dz} + V_{sy} \rho_n \bar{X} - \frac{V_{bx}}{2} \rho_p \bar{\delta} = 0 \quad (4.21)$$

где ρ_p — плотность расплава полимера при температуре плавления; X — ширина пробки; $\bar{\delta}$, $\bar{X}$ — средние по единичной длине канала толщина пленки расплава и ширина твердой пробки.

Это уравнение материального баланса определяет зависимость между толщиной слоя расплава, скоростью движения пробки и шириной пробки. Уравнение позволяет получить выражения, определяющие толщину пленки расплава δ и скорость плавления полимера ω_n на единице длины винтового канала как функции ширины пробки X , теплофизических и реологических характеристик полимера и параметров режима переработки:

$$\delta = \left\{ \frac{[2k_p(T_u - T_{пл}) + \eta V_j^2] X}{V_{bx} \rho_p [c_{pn}(T_{пл} - T_n) + \lambda]} \right\}^{0,5} \quad (4.22)$$

$$\omega_n = \frac{V_{bx} \rho_p \left[k_p(T_u - T_{пл}) + \frac{\eta}{2} V_j^2 \right] X}{2 [c_{pn}(T_{пл} - T_n) + \lambda]} = \Phi X^{0,5} \quad (4.23)$$

В этих выражениях

$$\omega_n = V_{sy} \rho_n \bar{X} = \frac{V_{bx}}{2} \rho_p \bar{\delta}; \quad V_j = (V_b^2 + V_{sz}^2 - 2V_b V_{sz} \cos \varphi)^{0,5} \quad (4.24)$$

$$\Phi = \left\{ \frac{V_{bx} \rho_p \left[k_p(T_u - T_{пл}) + \frac{\eta}{2} V_j^2 \right]}{2 [c_{pn}(T_{пл} - T_n) + \lambda]} \right\}^{0,5} \quad (4.25)$$

Параметр Φ служит мерой скорости плавления. Чем больше Φ , тем быстрее процесс плавления полимера в канале червяка.

Ширину твердой пробки находят из рассмотрения дифференциального уравнения материального баланса в зоне плавления (при постоянстве скорости движения пробки и в пренебрежении количеством материала, находящегося в тонком слое расплава), предполагая, что плавление начинается до попадания материала в зону плавления:

$$-\frac{d(HX)}{dz} = \frac{\omega_n}{\rho_n V_{sz}} \quad (4.26)$$

$$H = H_1 - \beta z$$

где H — высота твердой пробки, равная разности глубины винтового канала и толщины пленки расплава δ ; H_1 — высота винтового канала в начале зоны плавления; β — приращение высоты канала на единице его длины (конусность).

Решая эту систему уравнений (4.26) при начальных условиях $X|_{z=0}=X_1$, получают выражение

$$\frac{X}{\omega} = \frac{X_1}{\omega} \frac{H_1}{H} \left(1 - \frac{\Psi z}{\sqrt{H_1}(\sqrt{H_1} + \sqrt{H})} \right)^2 \quad (4.27)$$

Для каналов постоянной глубины $\beta \rightarrow 0$ и $H=H_1$. Тогда из последнего уравнения находим:

$$\frac{X}{\omega} = \frac{X_1}{\omega} \left(1 - \frac{\Psi z}{2H} \right)^2$$

где ω — ширина винтового канала; X_1 — текущее значение ширины пробки материала; $\Psi = \Phi / (V_{sz} \rho_n X_1^{0.5})$; z — координата длины винтового канала.

Длина зоны плавления z_n червяка с постоянной глубиной винтового канала равна

$$z_n = \frac{2G}{\Phi \omega^{0.5}} \quad (4.28)$$

где $G = V_{sz} H_0 \omega \rho_n$ — объемный расход твердой пробки (H_0 — глубина канала в начале зоны плавления).

Для червяков с конической зоной плавления

$$z_n = \frac{H_1}{\Psi} \left(2 - \frac{\beta}{\Psi} \right) \quad (4.29)$$

4.1.4. Гидродинамика потоков и производительность зоны дозирования

Картина движения расплава в зоне дозирования довольно сложна вследствие специфических свойств расплава, неньютоновского характера его течения, сложных условий теплообмена с окружающей средой, сложной геометрии канала, в котором происходит течение, из-за утечек через зазоры между червяком и цилиндром. В общем виде задача отыскания полей скоростей и давлений, а также расчета производительности зоны и потребляемой мощности сводится к совместному решению систем уравнений неразрывности, движения, энергии и уравнений, описывающих физическое состояние расплава, при соответствующих граничных условиях. Решение такой системы для ньютоновских жидкостей хорошо известно [2]. Предприняты попытки решения проблемы для аномально-вязких жидкостей [97—99], которые, однако, ограничиваются случаями изотермического течения. Ввиду сложности и громоздкости математических выкладок в данном разделе будет рассмотрен случай течения только ньютоновских жидкостей, причем неньютоновский характер расплава учитывается введением в расчеты эффективной вязкости.

Для упрощения математического анализа процесса, учитывая малую кривизну канала, можно использовать развертку канала на плоскость и обращенное движение (рис. 4.5). При

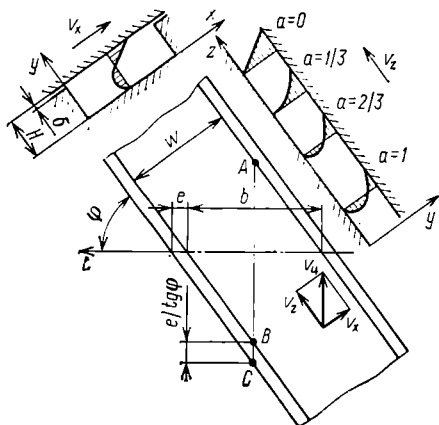


Рис. 4.5. К анализу гидродинамики в зоне дозирования. Пояснения в тексте.

изотермическом ламинарном режиме течения в канале постоянного поперечного сечения ввиду малой величины отношения глубины канала H к его ширине w можно предположить, что скорость в направлении канала v_z является функцией координат x и z , в то время как v_x — функцией только координаты y . Составляющая v_y наблюдается [12]

только вблизи нарезки червяка и ее влияние обычно не рассматривается. Кроме того, градиенты давления в направлении осей x , y и z могут быть приняты постоянными (за исключением областей, близких к боковым стенкам канала). Это было подтверждено в работе [101].

С учетом допущения о смачиваемости расплавом стенок канала и незначительности массовых сил для ньютоновской жидкости уравнения движения имеют вид

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \quad (4.30)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \quad (4.31)$$

при граничных условиях

$$\begin{aligned} v_z = 0 \text{ при } x = 0 \text{ и } x = w; \quad y = 0 \\ v_z = V_z \text{ при } y = H; \quad V_z = \pi N D \cos \varphi \\ v_x = 0 \text{ при } y = 0; \quad 0 \leq x \leq w \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$v_x = V_x \text{ при } y = H; \quad 0 \leq x \leq w; \quad V_x = \pi N D \sin \varphi$$

Решение уравнения (4.30) в форме [14]

$$v_z(x; y) = v_{zd}(x; y) + v_{zp}(x; y) \quad (4.33)$$

имеет вид

$$v_{zd} = \frac{4V_z}{\pi} \sum_{g=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{g} \frac{\operatorname{sh}(g\pi y/w)}{\operatorname{sh}(g\pi H/w)} \sin(g\pi x/w) \quad (4.34)$$

$$v_{zp} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \left[y^2 - \frac{Hy}{2} + \frac{4H^2}{\pi^3} \sum_{g=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{g^3} \frac{\operatorname{ch} \frac{g\pi(2x-w)}{2H}}{\operatorname{ch} \frac{g\pi}{2H/w}} \sin(g\pi y/H) \right] \quad (4.35)$$

Решением уравнения (4.31) является выражение

$$v_x = -V_x \frac{y}{H} - \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} (yH - y^2) \quad (4.36)$$

В уравнениях (4.34) и (4.36) первый член характеризует распределение скоростей вследствие вынужденного (прямого) потока под действием трения о движущийся цилиндр, а второй — потока вследствие существующего градиента давления — противотока.

Скорость v_z определяет производительность экструдера Q . Интегрируя уравнение (4.33) по площади поперечного сечения канала, получаем:

$$Q = \frac{V_z \omega H}{2} F_d - \frac{\omega H^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial z} F_p = \alpha N - \frac{\beta}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4.37)$$

где

$$F_d = \frac{16\omega}{\pi^3 H} \sum_{g=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{g^3} \operatorname{th} \left(\frac{g\pi H}{2\omega} \right)$$

$$F_p = 1 - \frac{192H}{\omega\pi^5} \sum_{g=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{g^5} \operatorname{th} \left(\frac{g\pi\omega}{2H} \right)$$

Первая составляющая производительности представляет собой прямой поток Q_p , вторая — поток утечек в канале червяка под действием давления в формующем инструменте Q_d . Отношение этих потоков

$$a = -\frac{Q_p}{Q_d} = \frac{H^2}{6V_z} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{F_p}{F_d} \quad (4.38)$$

характеризует степень «дресселирования» расплава в канале червяка и широко используется для анализа профиля скоростей потока. При отсутствии давления в головке $a=0$ для экструдера, работающего в режиме свободного выхода, и $a=1$ для режима закрытого выхода. Градиент давления в направлении оси канала определяется сопротивлением формующего инструмента и может быть найден при рассмотрении условий совместной работы экструдера и формующего инструмента, заключающегося в равенстве их производительности.

Градиент давления в поперечном направлении канала может быть найден из условия циркуляции расплава в этом направлении, при котором

$$\int_0^H v_x dy = 0$$

Это дает

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{6\eta V_x}{H^2} \quad (4.39)$$

Подстановка (4.39) в уравнение (4.36) приводит к соотношению

$$v_x = V_x \frac{y}{H} \left(2 - 3 \frac{y}{H} \right) \quad (4.40)$$

Анализ распределения скоростей v_z и v_x по высоте канала червяка (см. рис. 4.5) показывает, что v_x не зависит от условий течения и точка перегиба ($v_x=0$) всегда находится на высоте $\frac{2}{3}H$; в то время как для скорости v_z эта точка может иметь координату $0 \leq y \leq \frac{2}{3}H$. Это создает сложную картину циркуля-

ции расплава как в поперечном, так и продольном направлениях, и должно учитываться при рассмотрении процессов смешения в канале червяка.

Влияние кривизны канала, а также изменения эффективной вязкости расплава по сечению канала червяка на распределение скоростей и производительность может быть учтено введением дополнительных коэффициентов F_{cd} и $F_{\mu p}$ и $F_{\mu d}$ соответственно в уравнение (4.37) [86]. Анализ полей скоростей для аномально-вязкой жидкости приведен в работе [94].

Наряду с вынужденным потоком и противотоком в канале червяка в зазоре между гребнем нарезки червяка и внутренней поверхностью материального цилиндра наблюдается так называемый поток утечек, приводящий к уменьшению производительности экструдера. Существует несколько подходов к определению потока утечек [86, 94].

При рассмотрении потока расплава, проходящего через плоскость, нормальную оси червяка, производительность экструдера может быть найдена как суммарный поток на отрезке AB (см. рис. 4.5) канала червяка и участке BC , где течение можно рассматривать как течение через плоскую щель толщиной δ и шириной $ne/tg \varphi$ при градиенте давления $(\partial p / \partial l)_3$:

$$Q = Q_{AB} + Q_{BC} = \int (v_z \sin \varphi - v_x \cos \varphi) \frac{w dy}{\sin \varphi} + \frac{ne \delta^3}{12 \eta_3 \tan \varphi} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right)_3$$

Градиент давления в зазоре равен [86]

$$\left(\frac{\partial p}{\partial l} \right)_3 = \frac{-6 \eta \pi N D \cos \varphi}{H^2} \left[a \left(\frac{\pi D \cos \varphi}{ne} + \sin \varphi \right) + b \frac{c}{e} \sin \varphi \right] \quad (4.41)$$

где n — число заходов червяка;

$$c = \frac{\left(1 - \frac{\delta}{H}\right) - \left(\frac{\delta}{H}\right)^3 \frac{\eta}{\eta_3} \pi D a / (ne \tan \varphi)}{1 + \left(\frac{\delta}{H}\right)^3 \frac{\eta}{\eta_3} w / (e \cos \varphi)} \approx 1 - \frac{\delta}{H}$$

Производительность экструдера с учетом рассмотренных потоков определяется как

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 N H \left(1 - \frac{ne}{t}\right) \sin \varphi \cos \varphi}{2} \left(1 - a - \frac{\delta}{H}\right) - \frac{n \delta^3 \pi N D \cos^2 \varphi}{2 H^2} \frac{\eta}{\eta_3} \left[bc + a \left(\frac{\pi D}{n \tan \varphi} + e \right) \right] \quad (4.42)$$

В большинстве случаев потоком утечек можно пренебречь. Иногда для улучшения процесса смешения устанавливаются секции червяка с большим радиальным зазором δ . В этом случае расчет может быть выполнен только с учетом всех указанных потоков. Расчет производительности при переменной глубине канала приведен в работе [103].

Неизотермическое двухмерное течение расплава в канале червяка анализируется в работе [94].

4.1.5. Мощность, потребляемая экструдером

При расчете мощности, потребляемой экструдером, возможны несколько подходов.

Так, мощность P может быть рассчитана по затратам энергии на расплавление гранул, нагрев расплава до заданной температуры и продавливание расплава с заданной производительностью Q при противодавлении в формующем инструменте Δp . В случае пренебрежения инерциальными эффектами и сжимаемостью полимера из уравнения энергетического баланса следует:

$$\frac{P}{Q} = \int_{T_1}^{T_2} \rho c_p dT + \frac{\Delta p}{\rho} + \lambda \quad (4.43)$$

где T_1 и T_2 — температура полимера на входе и выходе экструдера; ρ — плотность; c_p — удельная теплоемкость полимера; λ — теплота плавления полимера.

В приведенном уравнении членом $\Delta p/\rho$ можно пренебречь ввиду его малости. Для широкого круга полимеров и условий их переработки удельная мощность экструзии лежит в пределах 0,47—0,86 МДж/кг.

Затрачиваемая мощность может быть рассчитана также на основании имеющихся моделей поведения материала в процессе его переработки в виде суммы мощностей, потребляемых в зоне загрузки, плавления и дозирования, а также в других специфических зонах, если они имеются (дегазации, смешения и т. п.).

Мощность, потребляемая в зоне питания, расходуется на преодоление сил трения при движении пробки и для отдельного участка длиной dz может быть рассчитана по формуле [94]

$$dP_n = \pi N D f_w \rho \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \varphi)} dz \quad (4.44)$$

Поскольку канал червяка может иметь переменную глубину и температуры поверхностей червяка и цилиндра, которые определяют величину коэффициентов трения, могут быть различными, расчет необходимо проводить ступенчатой аппроксимацией. Мощность, потребляемая в зоне загрузки, обычно невелика (около 10% от суммарной потребляемой мощности) и ее

можно не учитывать. Исключение составляют экструдеры с продольными канавками в зоне загрузки. В таких экструдерах мощность, потребляемая в этой зоне, в 2—5 раз больше, чем в экструдерах с гладким цилиндром, вследствие высоких развивающихся давлений и повышенной производительности.

В зоне плавления мощность $P_{пл}$ затрачивается на преодоление сопротивления движению пробки в тонком слое расплава вблизи стенки цилиндра, а также на преодоление сил трения пробки о сердечник червяка и его нарезку [105]. Для псевдопластичной жидкости, подчиняющейся степенному закону вида

$$\tau = m\dot{\gamma}^n$$

мощность, затрачиваемая в пленке расплава P_n , равна

$$P_n = m\omega L \left[\frac{\sin \varphi_n}{\delta_n(z)} \right]^n \left[\frac{\pi DN}{\sin(\theta + \varphi_n)} \right]^{n+1} \quad (4.45)$$

где L — длина зоны плавления; ω — ширина пробки; d — диаметр сердечника червяка; индекс « n » относится к сердечнику червяка.

Расчет мощности, затрачиваемой на перемещение твердой пробки относительно червяка, найденной как сумма произведений сил, действующих на червяк, на скорость относительного перемещения в направлении действия этих сил, дает:

$$P_T = f_4 \pi ND \frac{L \sin \theta}{\sin(\varphi_n + \theta)} p_6 \left(k_2 \omega \frac{D - 2H}{\sin \varphi} + 2k_1 H \frac{\sin \varphi_n}{\sin^2 \varphi_c} \right) + \\ + m \left(\frac{\pi ND}{\delta_n(z)} \frac{\sin \varphi_n}{\sin(\varphi_n + \theta)} \right)^n \omega_n \frac{\sin(\varphi_c + \theta)}{\sin \varphi_c} \quad (4.46)$$

где $k_1 = p_6/p$; $k_2 = p_4/p$ (здесь p_6 и p_4 — давление на боковые стенки канала и сердечник червяка); К. Шнайдер [105] нашел $k_1 = 0,5$ и $k_2 = 1$.

Суммарная мощность, потребляемая в зоне плавления $P_{пл} = P_n + P_1$. Следует отметить, что по длине пробки не только меняется ее ширина, но и на определенной стадии плавления происходит образование пленки и у сердечника червяка, что должно учитываться при определении границ применимости полученных выражений.

Мощность, затрачиваемая в зоне дозирования dP_d , определяется суммой мощности, расходуемой в самом канале червяка в результате работы сил вязкого трения и превращающейся в тепло dP_K ; мощности, расходуемой в зазоре между червяком и стенкой цилиндра dP_3 и мощности, необходимой для создания требуемого давления расплава dP_p . Расчет dP_d может быть выполнен на основании рассмотрения работы сил трения на поверхности цилиндра или расчета теплоты, выделяющейся в результате вязкого трения в расплаве. Первый способ [2, 97, 98] позволяет более точно учесть влияние температуры расплава вблизи стенки цилиндра, однако второй является более

строгим [91]. На основании изложенного

$$dP_d = dP_k + dP_p + dP_z = \Psi_k dV_k + dP_p + \Psi_z dV_z$$

где Ψ_k , Ψ_z — функции диссипации работы вязкого трения в канале червяка и в радиальном зазоре; V_k и V_z — объемы канала и зазора.

Функция диссипации энергии в канале червяка при сделанных ранее допущениях имеет вид

$$\Psi_k = \eta_k \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right]$$

Так как элементарный объем канала равен

$$dV_k = i w dy dz$$

то

$$dP_k = \eta_k \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right] i w dy dz \quad (4.47)$$

где i — число заходов червяка.

Соответствующие значения производных скоростей v_x и v_z могут быть найдены из полученных ранее уравнений (4.33) и (4.36). Для случая одномерного течения в канале ньютоновской жидкости

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_z}{\partial y} &= \frac{V_z}{H} \left[1 - 3a \left(1 - \frac{2}{3} \frac{y}{H} \right) \right] \\ \frac{\partial v_x}{\partial y} &= \frac{2V_x}{H} \left(3 \frac{y}{H} - 1 \right) \end{aligned}$$

Подстановка этих производных в уравнение (4.47) с учетом

$$\begin{aligned} V_x &= \pi N D \sin \varphi; & V_z &= \pi N D \cos \varphi \\ w &= \pi D (1 - ie/t) \sin \varphi; & dz &= dl / \sin \varphi \end{aligned}$$

и интегрирование в пределах от $y=0$ до $y=H$ и от $l=0$ до $l=L$ дает:

$$P_k = \frac{\pi^3 D^3 \eta_k (1 - ie/t)}{H} [(1 + 3a^2) \cos^2 \varphi + 4 \sin^2 \varphi] \quad (4.48)$$

Член $(1 + 3a^2) \cos^2 \varphi$ определяет мощность, расходуемую на продвижение расплава вдоль канала червяка, а $4 \sin^2 \varphi$ — мощность, расходуемую на циркуляцию расплава в поперечном направлении.

На создание давления расплава и его продавливание с расходом Q расходуется мощность

$$dP_p = Q dp \quad (4.49)$$

Из определения a находим:

$$dp = \frac{6\pi D N \eta_k a}{H^2 \tan \varphi} dl$$

$$Q = (1 - a) Q_d = \frac{1 - a}{2} \pi^2 D^2 \sin \varphi \cos \varphi \left(1 - \frac{ie}{t} \right) : HN$$

После их подстановки и интегрирования уравнения (4.49) в пределах от $l=0$ до $l=L$ получаем:

$$P_p = \frac{L}{H} 3\pi^2 D^3 N^2 \eta_k \cos^2 \varphi \left(1 - \frac{ie}{t}\right) a (1 - a) \quad (4.50)$$

При расчете мощности, потребляемой в зазоре между нарезкой червяка и цилиндром, функция диссипации может быть записана в виде

$$\Psi_3 = \eta_3 \left(\frac{\partial v_{03}}{\partial y} \right)^2 \quad (4.51)$$

а элементарный объем

$$dV_3 = i de \cos \varphi dz$$

Считая поле скоростей в зазоре только с учетом вынужденного потока, скорость сдвига можно приближенно определить как

$$\frac{\partial v_{03}}{\partial y} = \frac{V_c}{\delta}$$

где V_c — скорость стенки.

Очевидно, что учитывая неньютоновский характер поведения расплава в зазоре вязкость η_3 должна браться при определенной выше скорости сдвига. После подстановки и интегрирования получаем:

$$P_3 = \frac{i\pi^2 D^2 N^2 \eta_3 e L}{\delta \operatorname{tg} \varphi} \quad (4.52)$$

Суммарная мощность, потребляемая экструдером, равна

$$P = P_n + P_{пл} + P_d + P_{xx}$$

где P_{xx} — мощность холостого хода.

Наряду с аналитическим расчетом потребляемая мощность может быть рассчитана по эмпирическим соотношениям

$$P = c N^{1,25}; \quad P = P_0 (D/D_0)^2,5 \quad (4.53)$$

Так как c зависит от геометрических параметров червяка и свойств перерабатываемого материала, приведенные уравнения могут быть использованы для моделирования ряда однотипных экструдеров для переработки одних и тех же полимеров.

4.1.6. Характеристика экструдера и развиваемое им давление

Полученные уравнения производительности экструдера позволяют построить характеристику экструдера, или зависимость его производительности от давления в формирующем инструменте (рис. 4.6). Для случая изотермического процесса экструзии характеристика представляет собой семейство па-

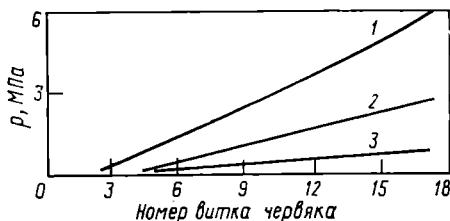
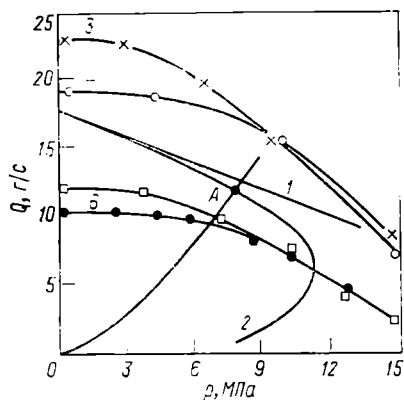


Рис. 4.7 Изменение давления по длине червяка при переработке композиции ФФС18 с 30% стекловолна (степень сжатия равна 1; $T=373$ К):

1—3 — при постоянной глубине нарезки червяка $H=6$ мм (частота вращения червяка: 1 — $0,1$ с $^{-1}$, 2 — $0,416$ с $^{-1}$, 3 — $0,833$ с $^{-1}$).

Рис. 4.6. Зависимость производительности одночервячного экструдера Q от давления в формующем инструменте p (рабочая характеристика):

1, 4, 6 — гравитационная загрузка (1 — изотермический режим; 2 — адиабатический режим); 3, 5 — загрузка червячным питателем.

Глубина канала червяка 6 мм; температура 373 К; частота вращения червяка $0,834$ с $^{-1}$ (3 и 4) и $0,417$ с $^{-1}$ (5 и 6).

параллельных прямых (на рисунке показана одна из них — прямая 1), проходящих через точки с координатами

$$Q_{\max} = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \varphi \cos \varphi; \quad P_{\max} = \frac{6 \pi \eta_e L H N \sin \varphi \cos \varphi}{e H^3 \sin^2 \varphi + \pi D \delta^3 \operatorname{tg} \varphi} \quad (4.54)$$

Анализ уравнения производительности экструдера показывает, что у экструдеров с малой глубиной канала червяка производительность меньше зависит от давления в формующем инструменте. Для ньютоновских жидкостей увеличение частоты вращения червяка приводит к параллельному сдвигу прямых, изображающих характеристику экструдера.

Действительная рабочая характеристика экструдера располагается между прямыми, отвечающими двум экстремальным режимам: изотермическому (кривая 1) и адиабатическому (кривая 2). Работа одночервячного экструдера в политропическом режиме для аномально-вязкой жидкости рассмотрена Торнером [94] с учетом изменения длины функциональных зон в зависимости от расхода и заданного температурного режима. Отклонение реального процесса от изотермического приводит к «искривлению» характеристики в сторону уменьшения ее жесткости. Рабочая точка экструдера (т. А на рис. 4.6) может быть получена совместным решением уравнений производительности экструдера и потока через формующий инструмент, рассчитываемого как

$$Q = k p / \eta_r \quad (4.55)$$

где k — константа сопротивления формующего инструмента; η_r — эффективная вязкость расплава в формующем инструменте (головке).

Интересно отметить, что вязкость оказывает одинаковое влияние на зависимость $Q=f(p)$ как для экструдера, так и для формующего инструмента, и производительность экструдера не зависит от вязкости жидкости. В адиабатическом режиме наблюдается некоторое увеличение производительности с повышением температуры переработки. Основным недостатком автогенного режима работы является зависимость температуры расплава на выходе экструдера от сопротивления формующего инструмента.

Характеристика экструдера в целом зависит также и от условий работы зоны загрузки. На представленных на рис. 4.6 характеристиках экструдера с принудительной загрузкой с помощью червячного питателя (кривые 3 и 5) и гравитационной загрузкой (кривые 4 и 6) четко прослеживается начальный участок, на котором производительность не зависит от давления на выходе из экструдера. Это является следствием недостаточной «независимой» производительности зоны загрузки, т. е. следствием $Q_3 < Q_d$. Для гравитационной загрузки это различие еще более выражено. Более подробно вопросы согласования работы экструдера и оформляющего инструмента будут рассмотрены ниже.

При описании характеристики экструдера необходимо отметить важность такого показателя работы экструдера, как развиваемое им давление.

Суммарное давление, развиваемое на выходе из экструдера, представляет собой сумму давлений, создаваемых в каждой из функциональных зон. Перепад давления, создаваемый в зоне плавления, может быть получен для степенной жидкости из уравнения [94]

$$\Delta P_n = \frac{\eta_0}{\sin \varphi} [\pi D N (n+1) \cos \varphi] \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \frac{B_{ni} l_{ni}}{H_i^{1 + \frac{1}{n}}} \quad (4.56)$$

путем расчета канала червяка как серии последовательно расположенных ступеней длиной в осевом направлении l_{ni} и постоянной глубиной H_i . Безразмерный перепад давления

$$B_n = \frac{\partial p}{\partial x} \bigg/ \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^*$$

определяется как отношение фактического градиента давления $\partial p / \partial x$ к нормирующему $(\partial p / \partial x)^*$, при котором напряжение на дне канала равно нулю. Расчет давления в зоне дозирования производится по аналогичным зависимостям [94].

Представленное на рис. 4.7 распределение давления по длине червяка с постоянной глубиной нарезки свидетельствует о непрерывном росте давления по мере продвижения материала вдоль экструдера. Однако в случае движения в канале переменного поперечного сечения могут иметь место как положи-

тельные, так и отрицательные градиенты давления, что определяется производительностью. При работе с формующим инструментом с малым сопротивлением в зоне плавления развиваются давления большие, чем в зоне дозирования, в то время как для инструмента с большим сопротивлением наблюдается монотонное увеличение давления вдоль червяка.

4.1.7. Процессы смешения в одночервячном экструдере

Процессы смешения в одночервячном экструдере протекают во всех трех зонах, рассмотренных выше, однако их интенсивность различна. В случае получения композиционных материалов из компонентов, имеющих различную геометрию частиц, возможно даже на некоторых стадиях ухудшение качества смеси.

В зоне загрузки и транспортировки нерасплавленного материала в зависимости от условий процесса либо перемешивание частиц может носить пробковый характер, либо может иметь место относительный сдвиг частиц. В обоих случаях в этой зоне наблюдается некоторое снижение качества смеси вследствие сепарации компонентов, увеличение коэффициента неоднородности смеси V_c . Это явление наблюдается в процессах получения композиционных материалов на основе как порошкообразного, так и волокнистого наполнителей (рис. 4.8, а). Подобная картина наблюдается также и в начале зоны плавления, где сепарация наполнителя связана с прилипанием его частиц к пленке расплава полимера. Наиболее интенсивно процесс смешения проходит в зоне плавления, а затем в зоне дозирования, причем смешение носит ламинарный характер за счет сдвиговых деформаций расплава.

Математическое описание процесса смешения в зоне плавления, изложенное впервые в работе [106], весьма сложно и основано на рассмотрении полей скоростей деформаций в пленке и в зоне циркуляции расплава. Так как выходящий из

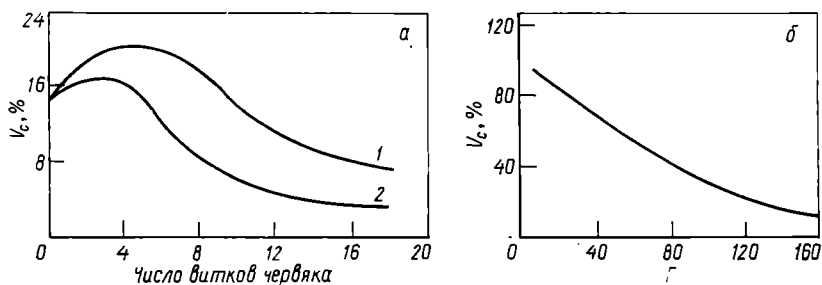


Рис. 4.8. Зависимость коэффициента неоднородности смеси V_c :

а — от длины червяка при переработке сухосмешанной композиции ФСС 18 со стекловолокном (1 — червяк с постоянной глубиной канала 4 мм; 2 — червяк со степенью сжатия 1,4; температура 373 К, давление 1,5 МПа); б — от обобщенной деформации сдвига при переработке ПВХ.

зоны плавления расплав окончательно гомогенизируется в зоне дозирования, чем и определяется качество продукта, основное внимание обычно уделяется именно этой зоне [2, 91, 94, 107, 108].

Поскольку согласно теории ламинарного смешения качество смеси однозначно определяется величиной приложенного к расплаву сдвига Γ за время его пребывания в экструдере, существующие теории устанавливают связь между параметрами процесса экструзии и отдельными компонентами сдвига, так как деформации носят сложный характер. Есть несколько подходов к выбору определяющего компонента сдвига.

Шенкель [102] в качестве определяющей использует величину наименьшего сдвига, претерпеваемого расплавом за время пребывания в экструдере. При такой постановке вопроса обеспечивается качество смешения заведомо более высокое, чем в среднем по объему материала.

Минимальной деформации сдвига, очевидно, подвергается расплав, частицы которого имеют координату $y = \frac{2}{3}H$; так как их скорость $v_x = 0$, они не участвуют в циркуляции и имеют минимальное время пребывания в экструдере t_n . Обозначив относительную координату ξ (для рассматриваемой точки $\xi = \frac{2}{3}$), можем записать:

$$\Gamma \Big|_{\xi = \frac{2}{3}} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_z}{\partial y}\right)_{\xi = \frac{2}{3}}^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y}\right)_{\xi = \frac{2}{3}}^2 \cdot t_n} \Big|_{\xi = \frac{2}{3}} \quad (4.57)$$

Найдя значения $\partial v_z / \partial y$ и $\partial v_x / \partial y$ из уравнений (4.33) и (4.36), а время пребывания в зоне дозирования из уравнения

$$t_n \Big|_{\xi = \frac{2}{3}} = \frac{L}{v_z \Big|_{\xi = \frac{2}{3}} \sin \varphi}$$

получаем:

$$\Gamma = 1,5 \frac{L}{H} \sqrt{\frac{4 \sin^2 \varphi + (1 + a^2) \cos \varphi}{(1 - a) \sin \varphi}} \quad (4.58)$$

Авторы [109] учли влияние на деформацию сдвига циркуляции в поперечном направлении канала, определив суммарную деформацию в виде

$$\Gamma = \Gamma_x \sin \varphi + \Gamma_z \cos \varphi$$

Деформации в направлениях x и z соответственно равны

$$\Gamma_x = \frac{LT_x}{H(1-a)\cos\varphi} \quad (4.59); \quad \Gamma_z = \frac{LT_z}{H\sin\varphi} \quad (4.60)$$

Комплексы T_x и T_z определяются как

$$T_x = f(v_x; v_z); \quad T_z = f(v_x; v_z)$$

причем связь между координатами положения частиц при циркуляции в верхней ξ_2 и нижней ξ_1 частях канала определяется из уравнения

$$\xi_2^{-2} - \xi_2^{-3} = \xi_1^{-2} - \xi_1^{-3} \quad (4.61)$$

Аналогичный подход был использован Торнером [94] при решении задачи для жидкости, подчиняющейся степенному закону. Величины Γ_x и Γ_z найдены как

$$\Gamma_x = \frac{L}{H \cos \varphi} G_1(\bar{a}) \quad (4.62); \quad \Gamma_z = \frac{L}{H \cos \varphi} G_2(\bar{a}) \quad (4.63)$$

где $\bar{a}$ — координаты сечений, в которых равны нулю напряжения τ_{ij} .

Авторами работы [82] было показано, что в процессе циркуляции расплава в канале червяка меняется ориентация частиц относительно направления сдвига, что должно учитываться при расчете общей деформации. Из рассмотрения двухмерной деформации частицы расплава было получено, что средняя толщина полос r должна определяться как

$$r = \frac{r_0}{(\Gamma_x + \Gamma_z) \theta^*}$$

где θ^* — концентрация компонента.

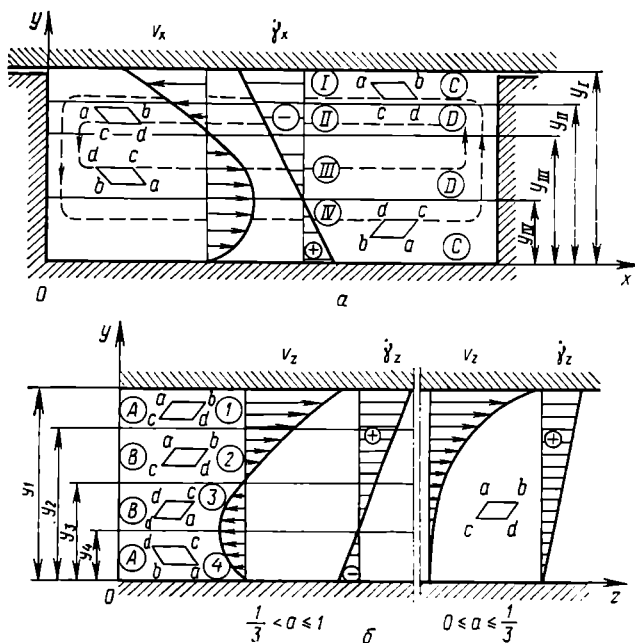


Рис. 4.9. К расчету деформации сдвига в поперечном (а) и продольном (б) направлениях винтового канала одночервячного экструдера. Показано направление деформации частицы $abcd$ в различных зонах. Пояснение в тексте.

Ввиду сложного распределения скоростей v_x и v_z в процессе движения по каналу частицы расплава попадают периодически в области с различными направлениями сдвига как в плоскости yoz , так и xoy (рис. 4.9). Причем характер деформации в этих зонах (A , B и $I-IV$) зависит и от величины a , поэтому необходимо отдельно рассматривать два случая:

$$1 \geq a \geq 1/3 \quad \text{и} \quad 0 \leq a \leq 1/3$$

Для нахождения координат границ отмеченных зон (физический смысл которых ясен из рис. 4.9) уравнение, связывающее координаты частиц при циркуляции в нижней $\bar{a}_1$ и верхней $\bar{a}_2$ частях канала, было линеализовано в виде

$$\bar{a}_2 = 1 - 0,45 \bar{a}_1 \quad (4.64)$$

Для $1/3 < a \leq 1$ координаты границ зон равны

$$\begin{aligned} y_I &= \frac{H}{2} \left(1 - \frac{1}{3a} \right) & y_{IV} &= \frac{1}{3} H \\ y_3 &= H \left(1 - \frac{1}{3a} \right) & y_{III} &= \frac{2}{3} H \\ y_2 &= H \left[1 - 0,255 \left(1 - \frac{1}{3a} \right) \right] & y_{II} &= 0,91 H \end{aligned}$$

Средние интегральные скорости сдвига в этих зонах составляют

$$\bar{\dot{\gamma}}_i^z = \frac{1}{y_i - y_{i+1}} \int_{y_{i+1}}^{y_i} \dot{\gamma}_i^z(y) dy; \quad \bar{\dot{\gamma}}_i^x = \frac{1}{y_i - y_{i+1}} \int_{y_{i+1}}^{y_i} \dot{\gamma}_i^x(y) dy$$

Деформации сдвига в плоскости yoz равны

$$\begin{aligned} \bar{\Gamma}_1^z &= \bar{\dot{\gamma}}_1^z t_1 N_A; & \bar{\Gamma}_2^z &= \bar{\dot{\gamma}}_2^z t_2 N_B \\ \bar{\Gamma}_3^z &= \bar{\dot{\gamma}}_3^z t_3 N_B; & \bar{\Gamma}_4^z &= \bar{\dot{\gamma}}_4^z t_4 N_A \end{aligned}$$

где $t_i = \omega / |\bar{V}_i^x|$ — время пребывания частиц полимера в зоне сдвига за одну циркуляцию; N_A и N_B — количество циркуляций в областях A и B за все время пребывания в экструдере;

$$N_A = \frac{L_z}{t_1 \bar{v}_1^z + t_4 \bar{v}_4^z}; \quad N_B = \frac{L_z}{t_2 \bar{v}_2^z + t_3 \bar{v}_3^z}$$

Так как в области B сдвиг в нижней и верхней частях канала происходит в одном направлении, а в области A в различных, то

$$\bar{\Gamma}_A^z = \bar{\Gamma}_1^z - \bar{\Gamma}_4^z; \quad \bar{\Gamma}_B^z = \bar{\Gamma}_2^z + \bar{\Gamma}_3^z$$

Подстановка соответствующих значений скоростей сдвига, времен пребывания и линейных скоростей дает окончательный

результат для $1 \geq a \geq \frac{1}{3}$:

$$\begin{aligned} \bar{\Gamma}^z \Big|_{\frac{1}{3} < a < 1} &= \frac{1}{H} [\bar{\Gamma}^z_A (y_4 + H - y_2) + \bar{\Gamma}^z_B (y_2 - y_4)] = \\ &= \frac{L_z}{H} \Phi_z(a) = \frac{L}{H \sin \varphi} \Phi_z(a) \end{aligned} \quad (4.65)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi_z(a) &= 4 \frac{-1,63 - 0,78a + 22,49a^2 - 16,45a^3}{0,65 + 15,54a + 37,25a^2 - 53,44a^3} + \\ &+ 6 \frac{1,56 + 5,17a + 5,73a^2 + 2,11a^3}{-1,02 + 18,85a - 9,65a^2 - 5,63a^3} \end{aligned}$$

Соответствующий расчет для режима работы $0 \leq a \leq \frac{1}{3}$ дает:

$$\bar{\Gamma}^z \Big|_{0 \leq a \leq 1/3} = \frac{L}{H \sin \varphi} \frac{6 - 4a}{5 - 9a} \quad (4.66)$$

Методика расчета $\bar{\Gamma}^x$ аналогична, но ввиду того, что координаты границ областей сдвига не зависят от параметра a , задача несколько упрощается. После нахождения $\bar{v}_i^x$, $\bar{\gamma}_i^x$ и времени пребывания частиц в зонах $I-IV$ за одну циркуляцию рассчитывается количество циркуляций для областей сдвига C и D по методике, аналогичной для областей A и B , с той разницей, что в выражения N_C и N_D входят средние интегральные скорости $\bar{v}_i^z$ для зон $I-IV$:

$$N_C = \frac{L_z}{t_{I\bar{v}^z_I} + t_{IV\bar{v}^z_{IV}}}; \quad N_D = \frac{L_z}{t_{II\bar{v}^z_{II}} + t_{III\bar{v}^z_{III}}}$$

Расчеты дали $\bar{\Gamma}^x_C \approx 0$, что свидетельствует о том, что сдвиг, полученный расплавом в зоне I , полностью компенсируется противоположно направленным сдвигом в зоне IV . Окончательно получаем:

$$\bar{\Gamma}^x = \frac{1,08L}{H \cos \varphi} \frac{1}{1 - a} \quad (4.67)$$

Таким образом, установленная взаимосвязь параметров экструзии с приобретаемой расплавом деформацией позволяет рассчитывать качество получаемого изделия или подбирать параметры работы для достижения требуемого качества смешения, выраженного через «толщину полос».

В случае сложного деформированного состояния, которое наблюдается в канале червяка, в качестве критерия, определяющего качество смеси, может быть принята обобщенная деформация сдвига:

$$\Gamma_{об} = \frac{3}{2\sqrt{2}(1+\mu)} \Gamma_0 \quad (4.68)$$

где μ — коэффициент Пуассона, равный 0,5; Γ_0 — октаэдрический сдвиг.

Величина октаэдрического сдвига Γ_0 равна

$$\Gamma_0 = \frac{2}{3} \sqrt{(\gamma_{xx} - \gamma_{yy})^2 + (\gamma_{xx} - \gamma_{zz})^2 + (\gamma_{yy} - \gamma_{zz})^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)} \quad (4.69)$$

В работе [100] показано, что коэффициент неоднородности V_c однозначно определяется обобщенной деформацией сдвига (рис. 4.8, б). Таким образом, на практике удобно использовать величину $\Gamma_{0б}$, несмотря на более сложный расчет.

4.1.8. Экструдеры со специальными функциональными зонами

В ряде случаев переработки и получения композиционных материалов использование червяка без специальных зон или устройств оказывается неэффективным, так как не достигается требуемая степень диспергирования и смешения, а в ряде случаев требуется проведение операции дегазации. Применение зон диспергирования, дополнительного смешения или дегазации позволяет улучшить качество продукта.

Ранее было отмечено, что плавление в одночервячном экструдере носит пленочный характер, а в результате отрыва пробки при $x/w \approx 0,2$ частицы нерасплавленного полимера попадают в расплав, и двигаясь с ним, могут достигать (особенно при больших производительностях) формующего инструмента. Для улучшения температурной однородности экструдата, а также увеличения скорости плавления полимера в конце зоны плавления могут устанавливаться различные диспергирующие элементы, а также устройства для отделения расплава от нерасплавленного полимера. В общем случае желательна установка диспергирующих элементов перед смесительными.

Диспергирующие элементы выполняются таким образом, чтобы создать большие напряжения сдвига в как можно большем объеме перерабатываемого материала. В смесительных элементах создаются большие деформации перерабатываемого материала. Некоторые виды смесительных элементов представлены на рис. 4.10. Наиболее простым диспергирующим элемен-

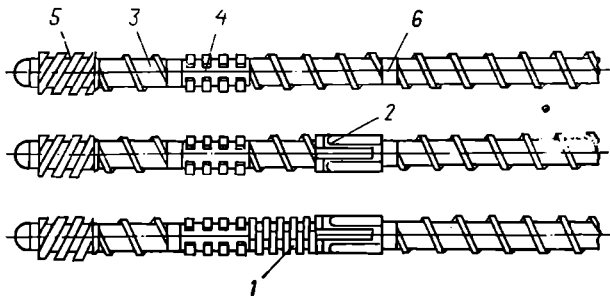


Рис. 4.10. Различные варианты взаимного расположения смесительных и диспергирующих элементов одночервячных экструдеров. Пояснения в тексте.

том является проточка в нарезке или смещение винтовой нарезки червяка 6. Кулачковые шайбы 1 могут быть различного профиля (круглые, треугольные), обычно устанавливаются в виде набора с последовательным поворотом на некоторый угол. Часто применяется торпеда с «обратной» нарезкой 5 и диспергирующий элемент Лероя 2, в котором перемещение расплава в осевом направлении возможно только через тонкий кольцевой зазор между поверхностью элемента и материального цилиндра. Хорошие результаты дает использование элемента с несколькими кольцевыми и продольными прорезями 4. В случае, когда требуется смещение без значительных тепловыделений в расплаве (переработка термочувствительных полимеров), может быть использована гладкая торпеда. Смесительные и диспергирующие элементы могут устанавливаться между зонами с обычной нарезкой червяка 3. Следует подчеркнуть, что в настоящее время конструирование смесительных и диспергирующих элементов является скорее искусством, чем наукой, так как отсутствуют необходимые теоретические предпосылки. Часто смесительные элементы используются как диспергирующие и наоборот.

Анализ работы рассматриваемых элементов весьма затруднен ввиду сложной гидродинамики потока в каналах элементов и сложного распределения времен пребывания частиц жидкости в каналах смесительных элементов. Одним из наиболее общих подходов к анализу эффективности работы элементов является определение эффективных коэффициентов продольного и поперечного перемешивания D_L и D_R в предположении, что зона смесительных и диспергирующих элементов может быть представлена диффузионной моделью проточного реактора. В этом случае для различных режимов работы экструдера снимаются кривые распределения времени пребывания как отклик системы на ступенчатое изменение концентрации индикатора на входе в зону. По кривой отклика находится величина σ^2 и диффузионный критерий Пекле Pe_L :

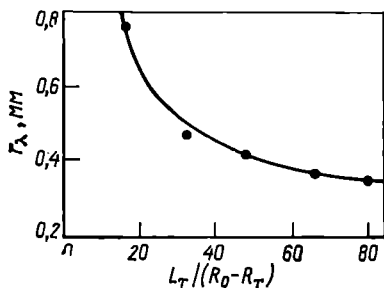
$$Pe_L = VL/D_L$$

где V — характерная скорость потока в элементе; L — длина элемента.

Из него определяется величина D_L . Очевидно, чем больше D_L , тем более интенсивно идет процесс смешения и наоборот.

В некоторых случаях возможен аналитический расчет эффективности работы элементов:

Рис. 4.11. Зависимость толщины полос r от относительной длины торпеды $L_T/(R_0 - R_T)$, у которой $R_0 = 18$ мм, а $R_T = 16$ мм.



гладкой торпеды, обратной нарезки, смесительных кулачков. Расчет обратной нарезки может быть выполнен с использованием уравнений для зоны дозирования экструдера.

Для гладкой торпеды, размеры которой указаны на рис. 4.11, распределение скоростей потока вдоль оси экструдера v_λ и в окружном направлении v_ϕ записывается в виде [2]

$$v_\lambda = \frac{R_0^2}{4\eta} \frac{\partial p}{\partial \lambda} \left[1 - \left(\frac{r}{R_0} \right)^2 + \frac{\beta^2 - 1}{\beta^2 \ln \beta} \ln \frac{r}{R_0} \right] \quad (4.70)$$

$$v_\phi = \frac{\pi N r}{R_\tau} \left[\frac{1 - (R_0/r)^2}{1 - (R_0/R_\tau)^2} \right] \quad (4.71)$$

Величины сдвига в направлениях λ и ϕ могут быть найдены по методике, разработанной для канала одночервячного экструдера, т. е.

$$\bar{\Gamma}_\lambda = \bar{\gamma}_\lambda t; \quad \bar{\Gamma}_\phi = \bar{\gamma}_\phi t$$

Пример результатов расчета представлен на рис. 4.11 в зависимости от отношения длины торпеды L_τ^k к радиальному зазору $R_0 - R_\tau$.

Одним из частных случаев работы зоны дозирования является режим работы с частично заполненным каналом, что широко применяется в дегазационных экструдерах для удаления из расплава захваченного гранулами воздуха, растворенных низкомолекулярных фракций, газов и т. д. Поскольку отсос летучих производится через отверстия в корпусе цилиндра в специально устраиваемой зоне дегазации *III* (рис. 4.12), в этой зоне необходимо создать условия для поддержания давления ниже атмосферного. Это достигается согласованием работы отдельных зон экструдера путем подбора глубины канала по зонам или установкой специальных дросселирующих устройств. В первом случае производительность дозирующей зоны *IV*, расположенной за зоной дегазации *III*, делается больше производительности дозирующей зоны *II* и зоны загрузки *I*, расположенных до дегазационной секции, вследствие применения червяков с отношением глубины канала в указанных зонах, равным 1,2—1,4. Глубина канала в самой зоне дегазации выполняется в 2—3 раза больше глубины канала в первой зоне дозирования.

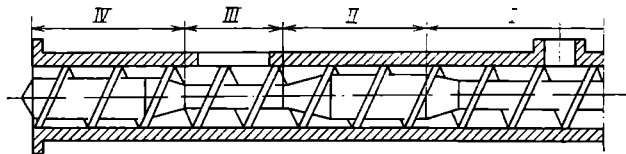


Рис. 4.12. Схема червяка дегазационного экструдера. Пояснения в тексте.

Наиболее важными элементами расчета зоны дегазации являются расчет ее производительности и длины, обеспечивающей необходимую степень удаления летучих.

Распределение расплава по витку в случае его неполного заполнения можно представить таким образом: основная масса расплава скапливается у толкающей стенки нарезки, заполняя канал на ширину $f\omega$, а часть расплава образует тонкий слой толщиной δ на поверхности материального цилиндра. Процесс дегазации наиболее интенсивно идет из этого слоя.

Пренебрегая расплавом, находящимся в виде тонкой пленки на стенке цилиндра, производительность этой зоны можно рассчитать по формуле прямого потока с учетом неполного заполнения канала [86] по методике, предложенной П. Сквайром, итерационным методом:

$$Q = \alpha F_f N$$

где

$$F_f = \frac{32f^2\omega}{\pi^3 H} \sum_{g=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{g^3} \operatorname{th} \frac{g\pi H}{4f\omega} \quad (4.72)$$

Изменение концентрации c летучих в пленке расплава на поверхности цилиндра может быть рассчитано для изотермического режима с использованием уравнения процесса удаления летучих в виде [104]

$$\frac{\bar{c}}{c_n} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} \exp \left[-(2n-1) \frac{\pi}{4} \operatorname{Fo}_d \right] \quad (4.73)$$

где Fo_d — диффузионный критерий Фурье; c_n , $\bar{c}$ — начальная и средняя концентрации летучего компонента в слое толщиной δ в момент t .

Наличие многозаходной нарезки червяка равнозначно нескольким смесительным устройствам, для которых

$$c_{ki} = c_{ni} a_i$$

где c_{ni} , c_{ki} — начальная и конечная концентрации в i -той зоне;

$$a_i = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} \exp \left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2}{4} \frac{Dt_i}{\delta^2} \right]$$

t_i — время пребывания в i -той зоне.

Принимая смешение на стыке зон идеальным, имеем:

$$\bar{c}_{ki} = \bar{c}_{n(i+1)}$$

Для расчета концентрации c_{ki} в качестве характерного времени пребывания t_i может быть взято время одного оборота червяка за вычетом времени перемещения любой точки материального цилиндра в окружном направлении нарезки червяка

и «запаса» расплава вблизи толкающей стенки нарезки червяка. Из этого следует, что эффективность процесса увеличивается с уменьшением степени заполнения канала червяка расплавом, однако при этом уменьшается производительность экструдера, поэтому требуется технико-экономический анализ для выявления оптимальных условий процесса дегазации.

4.1.9. Конструктивное оформление одночервячных экструдеров

Одночервячные экструдеры классифицируются по диаметру червяка D , отношению длины червяка L к его диаметру L/D и крутящему моменту на валу червяка. Современные одночервячные экструдеры имеют $D=20÷500$ мм и $L/D=15÷35$. В табл. 4.1 приведены основные параметры современных одночервячных экструдеров.

Конструкция загрузочного устройства (бункера). Загрузочные бункеры изготавливаются из листового металла или алюминевых сплавов. Они могут быть без перемешивающих устройств со смотровым окном для контроля уровня материала в бункере. При переработке материалов со склонностью к сводообразованию (зависанию) в бункере устанавливается перемешивающее устройство с постоянной частотой вращения привода. Для материалов с плохой сыпучестью (например, порошков, отходов производства пленок и нитей) в бункере предусматриваются устройства, обеспечивающие предварительное уплотнение материала. Применяются также загрузочные бункеры с вакуумированием с целью удаления летучих веществ из перерабатываемого материала; бункеры, в которых материал подогревается горячим воздухом (рис. 4.13); бункеры с многостажными дозирующими шайбами [110].

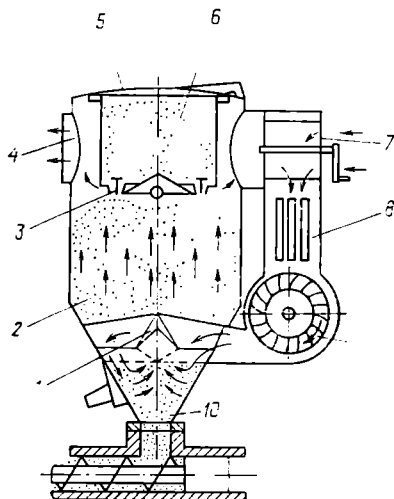
Привод экструдера. Частота вращения червяка и способы ее регулирования зависят от производительности одночервячных экструдеров. На рис. 4.14 представлена зависимость частоты

Таблица 4.1. Основные параметры одночервячных экструдеров

Диаметр червяка, мм	Длина червяка	Частота вращения червяка, об/мин	Мощность привода, кВт	Крутящий момент на валу червяка, Н·м	Мощность нагревательных элементов, кВт	Области применения
32	20 D	8—125	4	—	3,5	Производство кабелей
45	25 D	6—234	29	1,177	5,4	Производство труб, профилей, гранул, кабелей
63	25 D	6—187	37	1,883	9,7	Производство профилей, гранул, кабелей, пленок и листов
	25 D	6—234	56	2286	9,7	
	30 D	6—234	56	2286	13	
90	25 D	6—177	85	4591	16,4	Производство гранул, профилей, пленок при переработке отходов
	30 D	6—88	85	9241	21	
	30 D	6—177	85	4680	18	

Рис. 4.13. Бункер с предварительным подогревом материала горячим воздухом:

1 — распределительное сопло; 2 — корпус бункера; 3 — магнитный затвор; 4 — штуцер отвода воздуха; 5 — загрузочный люк; 6 — промежуточная емкость; 7 — вентиль для подачи свежего воздуха; 8 — регулятор температуры горячего воздуха; 9 — воздуходувка; 10 — загрузочная воронка экструдера.



вращения от диаметра червяков [113], причем верхняя граница области частот вращения выбрана из условия обеспечения максимальной скорости сдвига. На рис. 4.15 представлена зависимость крутящих моментов на валах червяков современных одночервячных экструдеров от диаметров червяков [113]. Соответствующим варьированием крутящего момента и частоты вращения червяков достигают необходимой производительности для каждого типоразмера экструдера (рис. 4.16). При выборе типа привода необходимо исходить из эффективного крутящего момента, необходимого для пластикации и нагнетания перерабатываемого материала.

Крутящий момент должен надежно обеспечивать во всей области частот вращения работу экструдера в период пуска и установившегося режима (рис. 4.17). С увеличением частоты вращения червяков увеличиваются удельные энергозатраты

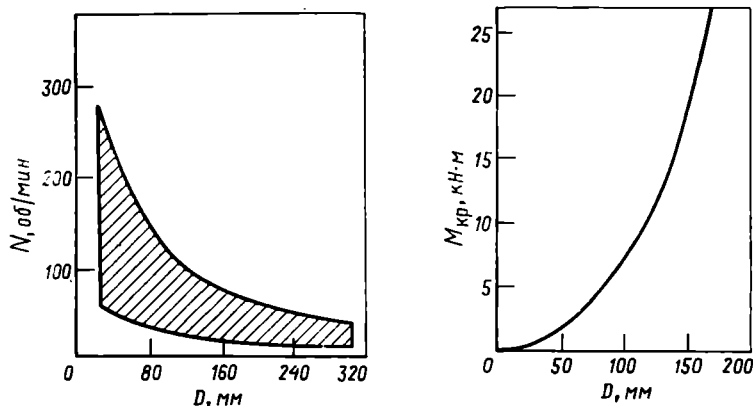


Рис. 4.14. Зависимость частоты вращения червяка N от диаметра червяка D . Заштрихованный участок — область рабочих частот вращения.

Рис. 4.15. Зависимость крутящего момента $M_{кр}$ на валу червяка от диаметра D .

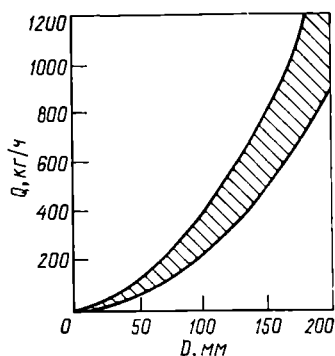


Рис. 4.16. Зависимость производительности Q одночервячного экструдера от диаметра червяка. Заштрихованный участок — область рабочей производительности.

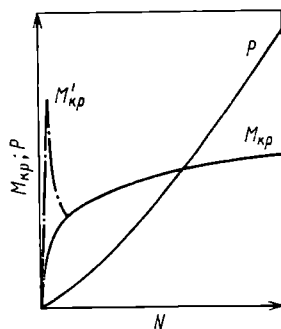


Рис. 4.17. Зависимость крутящего момента $M_{кр}$ и мощности привода P от частоты вращения червяка N ($M_{кр}'$ — пусковой момент).

P/Q (рис. 4.18). Удельные энергозатраты при экструзии складываются из мощности привода и нагревательных элементов (цилиндра и формующего инструмента). Каждая составляющая удельных энергозатрат зависит от условий технологического процесса (частоты вращения червяка, давления в формующем инструменте, температурного режима), от типа перерабатываемого материала и от геометрии червяка.

С увеличением частоты вращения червяка уменьшается мощность, расходуемая на нагревательные элементы, и увеличивается мощность привода (рис. 4.19) [112].

В качестве привода служат электродвигатели постоянного или переменного тока. В случае использования экструдера для переработки конкретного типа полимера применяется ступенчатое регулирование частоты вращения червяков. Гидравлические приводы или механические коробки скоростей в современных экструдерах имеют ограниченное применение.

Конструкции червяков. В современных одночервячных машинах применяются червяки длиной $L = (15 \div 35)D$ и диаметром D , равным 32, 45, 63, 90, 125, 160 и 200 мм. Частота вращения червяков $N = 10 \div 400$ об/мин. В зависимости от выполняемой задачи червяк по длине делится на следующие зоны: зона транспортировки (загрузки) твердого материала; зона пластикации (плавления); зона дозирования (выдавливания).

Зона загрузки в современных экструдерах составляет по длине $L_3 = (2 \div 10)D$. Глубина винтового канала в зоне загрузки $h_3 = (0,12 \div 0,16)D$ (постоянна или слегка убывает), а ширина гребня $e_3 = (0,08 \div 0,1)D$; шаг винтовой нарезки $t = (0,8 \div 1,2)D$; величина кольцевого зазора между гребнем червяка и цилиндром $\delta = (0,06 \div 0,1)D$. Глубина канала $h_3 > 2l$,

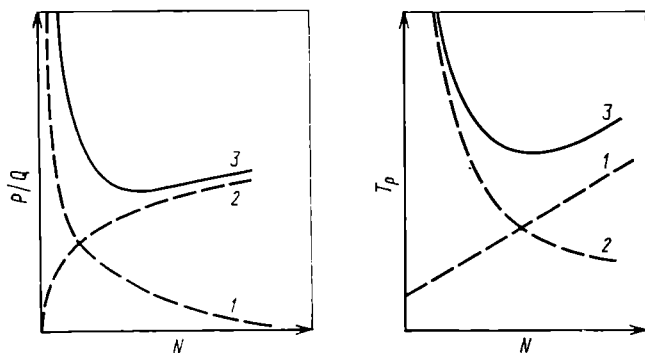


Рис. 4.18. Зависимость удельной мощности привода P/Q от частоты вращения червяка N :

1 — удельная мощность потерь; 2 — удельная потребляемая мощность; 3 — общая удельная мощность.

Рис. 4.19. Зависимость температуры расплава T_p от частоты вращения червяка N :

1 — изменение температуры расплава за счет диссипативного тепловыделения; 2 — изменение температуры расплава за счет внешнего нагрева; 3 — результирующая температура расплава.

где l — максимальный характерный размер частиц перерабатываемого материала.

Зона пластикации (плавления) может иметь длину в пределах $(1 \div 15)D$. Длина этой зоны оказывает большое влияние на скорость плавления и стабильность процесса и определяется в большинстве случаев экспериментально по кривой изменения удельного объема полимера по длине червяка. Отношение объемов одного витка винтового канала в начале и в конце зоны пластикации (геометрическая степень конверсии) рассчитывается по формуле

$$k = \frac{D_n^2 - d_n^2}{D_d^2 - d_d^2} \quad (4.74)$$

где D_n и d_n — диаметры червяка и сердечника в начале зоны пластикации; D_d и d_d — диаметры червяка и сердечника в начале зоны дозирования.

Экспериментально установлены следующие значения геометрической степени конверсии k :

Гранулированный ПЭНП	От 1:1,5 до 1:3
ПЭВП	От 1:2 до 1:2,5
Порошкообразный ПЭНП	От 1:3 до 1:5
Пластифицированный ПВХ	От 1:2,5 до 1:3
Непластифицированный ПВХ	От 1:1,5 до 1:2,2

В конце зоны пластикации часто устанавливаются смесительные элементы, которые оказывают благодаря высоким скоростям сдвига дополнительное пластицирующее воздействие.

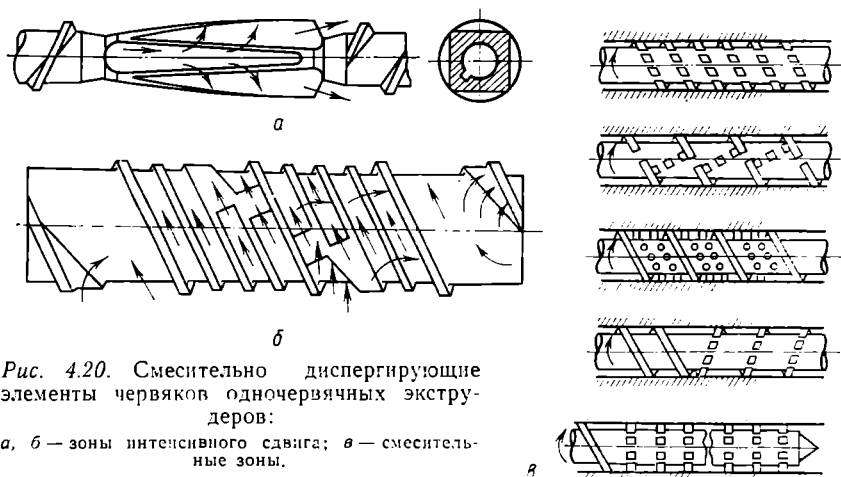


Рис. 4.20. Смесительно диспергирующие элементы червяков одночервячных экструдеров:

а, б — зоны интенсивного сдвига; в — смесительные зоны.

Зона дозирования выполняется длиной $L_d = (2 \div 12) D$ и с глубиной канала, равной

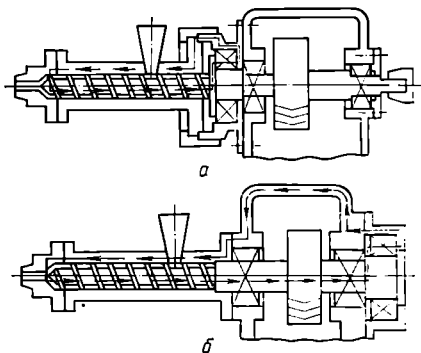
$$h_d = 0,5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4h_n}{k} (D - h_n)} \right]$$

При переработке низковязких материалов глубина канала выбирается меньшей, чем при переработке высоковязких полимеров. Часто в зоне дозирования предусматривается декомпрессия расплава. Верхняя граница скорости вращения червяка для каждого конкретного полимера ограничивается максимально допустимым диссипативным нагревом (для полиэтиленов и других термостойких полимеров — 50 м/мин, для непластифицированного ПВХ, ПММА, АБС-пластика и др. — 10—20 м/мин). Минимальная скорость вращения при данной мощности привода определяется прочностью червяка при кручении.

Технически грамотное конструирование червяка обуславливается при конкретных требованиях множеством факторов (особенно глубиной канала, степенью компрессии, удельной степенью сжатия — компрессией на единицу длины червяка, длинами функциональных зон и т. д.). На рис. 4.20 представлены типичные варианты смесительных и диспергирующих элементов. Термостатирование червяков дает большую степень свободы при выборе их конструкции. Червяки изготавливают специальными фрезами на токарно-винторезных станках последующим шлифованием (до чистоты обработки $R_a \leq 6,3$ мкм). Червяки изготавливаются из цементируемых хромомолибденовых, хромоникелевых и других сортов нержавеющей сталей. Поверхностная твердость обеспечивается различными методами последующей термообработки (закалкой, цементированием). Высокая коррозионная стойкость достигается твердым хромированием.

Рис. 4.21. Схемы передачи осевого усилия на подшипники:

а — кратковременное воздействие усилия (корпус редуктора не нагружен); *б* — длительное воздействие усилия (корпус редуктора воспринимает осевое усилие).



На червяках монтируются конические самоустанавливающиеся подшипники (для восприятия аксиальных и радиальных нагрузок) в сочетании с радиальными подшипниками, воспринимающими только радиальные силы. Корпуса и другие элементы подшипников рекомендуется монтировать таким образом, чтобы обеспечивать кратковременное силовое воздействие (рис. 4.21). При расчете подшипников по стандартным методам принимают давление в конце червяка равным 70—80 МПа и срок службы — 30 000 ч [112].

Материальный цилиндр одночервячных экструдеров, как правило, выполняется как единая деталь. Только цилиндры с пазами в зоне загрузки делают составными (рис. 4.22).

Цилиндр крепится к корпусу подшипника при помощи фланца; соединение цилиндра с формующим инструментом осуществляется откидными болтами или (реже) байонетными затворами.

Загрузочный бункер с цилиндром соединяется по посадке.

При конструировании цилиндров их необходимо рассчитывать на внутреннее давление до 120 МПа. Материальные цилиндры изготавливают методом глубокого сверления с последующими доводками до необходимой чистоты поверхности и термообработкой. Материалом для изготовления цилиндров служат цементируемые стали. При переработке высокоабразивных полимерных материалов применяются цилиндры из высоко- или низколегированных углеродистых сталей или в них запрессовываются износостойкие гильзы.

Нагрев материального цилиндра осуществляется нагревателями сопротивления (индукционные нагреватели, нагрев паром или горячими маслами применяются в особых случаях).

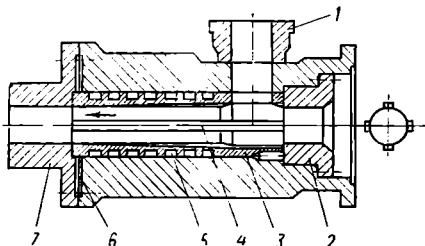


Рис. 4.22. Составной материальный цилиндр с продольными пазами в зоне загрузки одночервячного экструдера:

1 — загрузочная воронка; *2* — уплотнительная втулка; *3* — гильза с продольными пазами; *4* — продольные пазы; *5* — каналы для охлаждающей воды; *6* — теплоизоляционный затвор (воздушная подушка); *7* — материальный цилиндр экструдера.

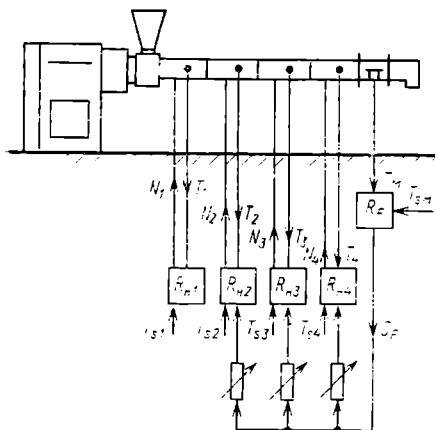


Рис. 4.23. Схема каскадного регулирования одночервячного экструдера:

T_1, T_2, T_3, T_4 — температуры перерабатываемого материала в зонах регулирования; $T_{s1}, T_{s2}, T_{s3}, T_{s4}$ — установленные температуры зонных регуляторов; T_m — температура расплава полимера на конце червяка; R_F — выходной сигнал основного регулятора R_F ; T_{sm} — требуемая температура расплава; $R_{n1}, R_{n2}, R_{n3}, R_{n4}$ — регуляторы температуры стенки цилиндра; N_1, N_2, N_3, N_4 — мощности нагревательных элементов зон.

Для отвода избыточного тепла, особенно в зонах плавления и дозирования, а также обеспечения необходимого режима движения материала в зоне загрузки применяется охлаждение цилиндра: воздушное с помощью вентиляторов (так называемое «мягкое» охлаждение со скоростью 2,5 град/мин при температуре цилиндра 470 К); водяное охлаждение (так называемое «жесткое» охлаждение) при переработке материалов с большим диссипативным тепловыделением или у машин с $D \geq 120$ мм.

Регулирование температурного режима осуществляется с помощью электронных трехточечных регуляторов дистанционного управления. Путем регулирования температуры стенки цилиндра по зонам обеспечивается регулирование температуры в массе полимера (термопары вводятся непосредственно в перерабатываемый материал). От температуры стенки цилиндра зависит градиент температуры на стенке цилиндра и в перерабатываемом материале. Температурная программа задается по зонам и должна соответствовать геометрии отдельных зон и состоянию перерабатываемого материала. Температура стенки цилиндра измеряется железо-константовыми термопарами, термометрами сопротивления.

Для замера истинной температуры расплава полимера на конце червяка, т. е. на входе в формующий инструмент, независимо от колебаний температуры стенки цилиндра (из-за нарушений стабильности процесса), применяется так называемое каскадное регулирование (рис. 4.23). Температура массы расплава T_m замеряется на конце червяка как основная величина регулирования, вводится в регулятор R_F и замеренная величина сравнивается с установленной требуемой величиной T_{sm} ; в зависимости от отклонения $T_m - T_{sm}$ устанавливаются выходной сигнал J_F основного регулятора R_F , необходимая величина T_{si} регулятора температуры стенки цилиндра R_{ni}

(регулятора включения). Таким образом, включают или отключают нагревательные элементы зон (установленная величина N_i) и этим самым корректируют непосредственно температуру стенки T_i до необходимой величины T_{si} .

4.1.10. Технология экструзии в одночервячном экструдере

При выборе экструдера следует учитывать температурный режим (температурную программу), частоту вращения червяков, давление в головке, конкретный вид изделия и производительность. В табл. 4.2 для некоторых технологических процессов и некоторых перерабатываемых материалов приведены значения указанных величин.

Работа одночервячных пластицирующих экструдеров главным образом определяется стабильностью характера роста давления в зоне загрузки. Способность к повышению давления в этой зоне зависит прежде всего от условий трения материала о цилиндр и червяк. Знание коэффициентов трения различных типов перерабатываемых материалов о сталь в зависимости от температуры и других условий весьма важно для выбора оптимальных параметров работы экструдера. На рис. 4.24 представлены значения коэффициентов трения для некоторых полимеров по стали [111].

Стабильное соотношение коэффициентов трения может быть гарантировано, если на внутренней поверхности цилиндра предусматривать так называемые «подпорные поверхности» — пазы различной конфигурации. В этом случае во избежание преждевременного плавления полимера зона загрузки интенсивно охлаждается. Применяются прямоугольные и полукруглые пазы, расположение аксиально по винтовой линии. Радиальные пазы в случае переработки порошкообразных полимеров выполняются слегка коническими. Длина пазов $L = (3 \div 4)D$; число пазов и их размеры (ширина $\times$ максимальная глубина) для прямоугольных пазов равны [114]:

Диаметр червяка D , мм	Число пазов	Размеры пазов, мм
45	4	8 $\times$ 3
60	6	8 $\times$ 3
90	8	10 $\times$ 4
120	12	10 $\times$ 4
160	16	10 $\times$ 4

Так как интенсивность передачи сил трения от внутренней поверхности цилиндра к перерабатываемому материалу ограничена «внутренней его прочностью» (соотношение коэффициентов внутреннего трения для системы полимер — полимер следующее: ПЭВП/ПЭВП — $0,1 \div 0,25$; ПС/ПС — $0,5$; ПА $6,6$ /ПА $6,6$ — $0,25$; ПВХ жесткий/ПВХ мягкий — $0,4 \div 0,6$), то при использовании рифленых втулок в зоне загрузки применяется меньшая глуби-

Таблица 4.2. Технологические параметры переработки некоторых типов термопластов в одночервячных экструдерах

Перерабатываемый материал	Изделия	Максимальная производительность, кг/ч	Особенности экструдера	Формующий инструмент	Частота вращения червяка, об/мин	Температуры в цилиндре и формующем инструменте*, К
Непластифицированный ПВХ	Трубы, профили (массивные)	30	Дозирующий червяк; $D = 45$ мм $L = 25 D$	Трубная головка с дорнодержателем	2—60	$\frac{403-443}{453}$
	Трубы из вспененного материала	80	Дозирующий червяк со смесительными элементами; $D = 63$ мм $L = 25 D$	То же	2—37	$\frac{413-433}{403}$
Пластифицированный ПВХ	Мягкие профили	250	Двухступенчатый червяк с интенсивной зоной сдвига в конце первой ступени; $D = 90$ мм $L = 25 D$	Профильная головка	13—142	$\frac{398-433}{448}$
	Кабели	650	Двухступенчатый червяк со смесительными элементами	Кабельная головка	5—153	$\frac{398-433}{448}$
Пластифицированный ПВХ порошкообразный		950	$D = 160$ мм $L = 25 D$	То же	4—122	$\frac{423}{433}$

ПЭНП гранулированный	Рукавные плески	400	Двухступенчатый червяк со смесительными элементами	Пленочная головка	13—152	<u>443—473</u> 473
	Изоляция проводов	110	$D = 63$ мм $L = 30 D$	Кабельная головка	7—238	<u>463—553</u> 538
	Гранулы	250	Цилиндр с одной зоной дегазации, с приспособлениями для принудительной подачи материала и фильтрации расплава	18-ручьевая головка	6—88	<u>443—453</u> 443
	Кабели	450	Цилиндр с водяным охлаждением загрузочной воронки	Кабельная головка	5—153	<u>443—453</u> 443
	ПЭВП гранулированный	560	$D = 125$ мм $L = 25 D$	То же	5—153	<u>463—493</u> 508

* В числителе — температуры в цилиндре, в знаменателе — в формирующем инструменте.

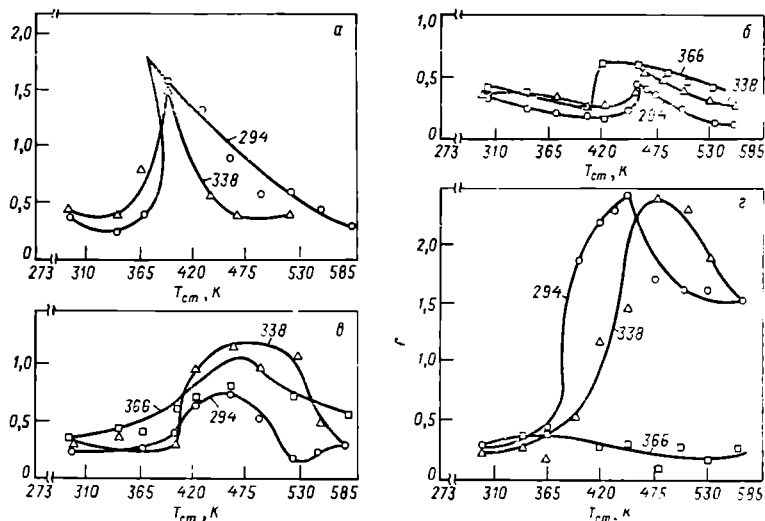


Рис. 4.24. Зависимость коэффициентов трения различных полимеров от температуры стали $T_{ст}$ (числа у кривых — температура полимера):
а — ПЭВП; б — ПП; в — ПЭНП; г — АБС-пластик.

на канала, чем при гладкой внутренней поверхности цилиндра в этой зоне (примерно в 2 раза меньше). Кривые изменения давления при использовании рифленых втулок и гладких цилиндров представлены на рис. 4.25. На рис. 4.26 показано изменение производительности экструдера в указанных вариантах, а на рис. 4.27 — известные диаграммы $Q-p$ для обоих случаев. В зоне пластикации необходимо выбирать такой температурный режим, который бы способствовал как можно более быст-

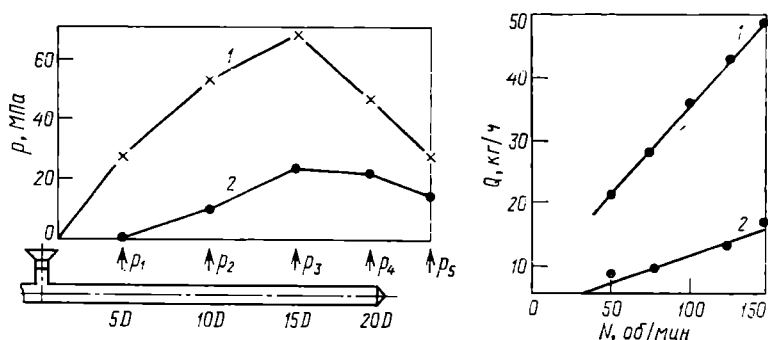


Рис. 4.25. Изменение давления по длине червяка:

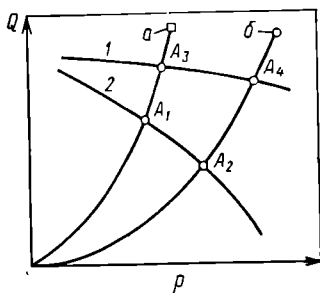
1 — при применении специальных напорных загрузочных зон (с пазами) при температуре расплава на выходе 500 К и производительности 49 кг/ч; 2 — для традиционных червяков при температуре расплава 545 К и производительности 17 кг/ч.

Рис. 4.26. Повышение производительности при применении специальных конструкций втулок в зоне загрузки:

1 — рифленая втулка; 2 — гладкая втулка.

Рис. 4.27. Рабочие характеристики червяка (1, 2) и головки (а, б) одночервячного экструдера:

1 — червяк с напорной (специальной) зоной загрузки; 2 — традиционный червяк; проходное сечение головки «а» больше, чем головки «б»; A_1 — A_4 — рабочие точки.



рому разогреву перерабатываемого материала. Для обеспечения хорошего качества экструдата необходимо получение гомогенной массы расплава при незначительной пульсации давления в конце зоны пластикации. Технологические параметры процесса экструзии — частота вращения червяка, температура соответствующих зон, давление на входе в зону дозирования — и геометрические параметры зоны пластикации червяка (прежде всего удельная степень сжатия k/L) находятся в тесной взаимосвязи. Поэтому необходимо найти оптимальное соотношение указанных параметров [115] (рис. 4.28).

В конце зоны пластикации (в начале зоны дозирования) монтируют смесительные элементы, интенсифицирующие процесс деформации перерабатываемого материала (дифференциальные сдвиговые элементы) (см. рис. 4.20, а, б). Подвод тепла к этим элементам интенсивного сдвига выбирается таким, чтобы

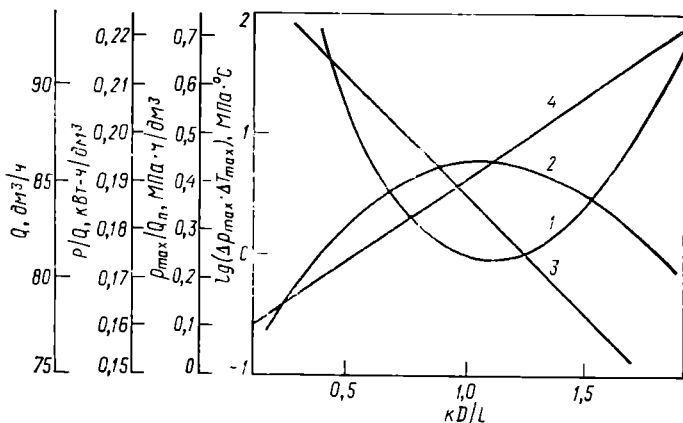


Рис. 4.28. Оптимизация переходной зоны (зоны пластикации) одночервячного экструдера:

1 — показатель флуктуации (произведение максимальных колебаний давления $\Delta p_{\max}$ и температуры $\Delta T_{\max}$ в измерительном контуре); 2 — показатель стабильности (отношение максимального давления расплава в переходной зоне $P_{\max}$ к производительности Q_n ; 3 — производительность Q ; 4 — удельная потребляемая мощность N/Q (температура цилиндра 530 К, давление на конце червяка 10 МПа, частота вращения червяка 110 об/мин).

создавать высокие напряжения сдвига, обеспечивающие разрушение (диспергирование) непроплавленных частиц.

В зоне дозирования расплав гомогенизируется. При этом специальными смесительными элементами при постоянной температуре расплава поддерживают поперечный (циркуляционный) поток (см. рис. 4.20, в).

Качество расплава непосредственно может быть оценено датчиками давления и температуры, замеряющими абсолютные их значения, а также их колебания во времени и в пространстве.

4.2. ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРОВ В ДВУХЧЕРВЯЧНЫХ ЭКСТРУДЕРАХ

4.2.1. Назначение, принцип работы и классификация двухчервячных экструдеров

Появление и все более широкое применение многочисленных машин связано с некоторыми существенными недостатками одночервячных экструдеров: а) невозможность создавать режимы высоких давлений без уменьшения объемной производительности экструдера; б) невозможность регулирования спектра времен пребывания материала в экструдере; в) отсутствие сильно выраженного градиента скорости сдвига перерабатываемого материала, необходимого для перемешивания и гомогенизации; г) неспособность создавать непрерывно обновляющиеся эффективные поверхности перерабатываемого материала для осуществления процесса массопередачи. Кроме того, при загрузке одночервячных экструдеров крошкой и мелкодисперсным порошком с низкой насыпной массой, а также расплавом или пастой, прилипающей к червяку, транспортирование материала, как правило, либо неудовлетворительное, либо вовсе отсутствует.

Несомненными преимуществами многочисленных экструдеров, наиболее распространенными из которых являются двух-

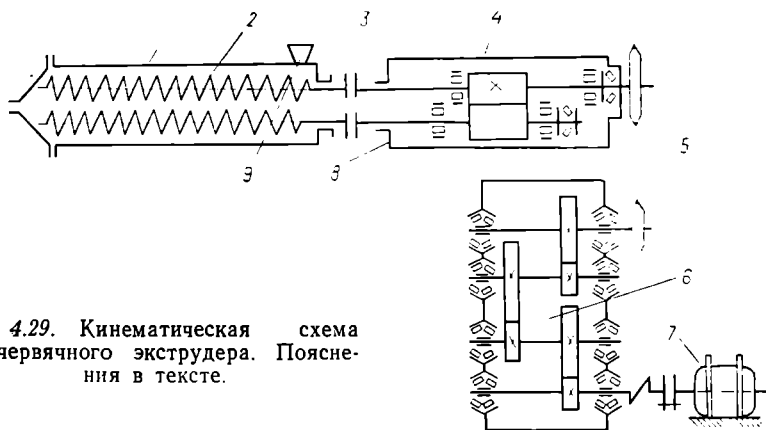


Рис. 4.29. Кинематическая схема двухчервячного экструдера. Пояснения в тексте.

червячные, являются хороший захват исходного продукта в зоне питания независимо от формы сырья, принудительное продвижение материала к формующему инструменту, взаимная самоочистка червяков.

Различие в принципах работы двух- и одночервячной машин связано с разными механизмами создания давления в перерабатываемом материале. Если у одночервячного экструдера давление развивается благодаря вязкому течению, вызванному относительным движением червяка в цилиндре, то у двухчервячных экструдеров — за счет выжимающего действия витка сопряженного червяка. Способность к развитию давления у одночервячного экструдера определяется глубиной винтового канала (точнее, величиной h^3), в то время как у двухчервячного — геометрической степенью замкнутости винтового канала, которая определяется по формуле

$$\xi = \frac{ie}{t - ie} \quad (4.75)$$

где e — ширина гребня; t — шаг винтовой нарезки; i — число заходов.

Величина ξ показывает, какая часть сечения канала перекрывается, и характеризует принудительность транспортирования перерабатываемого материала к формующему инструменту экструдера и способность червяка развивать давление.

Кинематическая схема двухчервячного экструдера приведена на рис. 4.29. Червяки приводятся во вращение от электродвигателя 7 с бесступенчатым регулированием частоты вращения. Вал электродвигателя муфтой соединен с быстроходным валом трехступенчатого редуктора 6. Выходной (тихоходный) вал редуктора цепной передачей 5 и зубчатыми колесами 4 через жесткую муфту 3 связан с червяками 2. Основными конструктивными элементами двухчервячного экструдера являются материальный цилиндр 1, червяки 2, подшипниковый узел 8, коробка скоростей и электродвигатель 7. Перерабатываемый материал подается через загрузочную воронку 9.

У двухчервячного экструдера основными рабочими органами являются находящиеся в зацеплении червяки, которые могут вращаться как в одну, так и в разные стороны. При вращении в одну сторону направление винтовой нарезки обоих червяков совпадает, в случае встречного вращения оно различно (рис. 4.30).

В зависимости от назначения экструдеры могут оснащаться червяками одного из следующих типов: 1) с малой и нулевой степенью сжатия; в основном их применяют для смешения материалов при относительно низких температурах, а также для переработки полимеров, чувствительных к нагреву; 2) червяками со степенью сжатия 1 : 1,5; обычно их используют для смешения и переработки термопластов; 3) червяками со степенью сжатия 1 : 2; они могут применяться для тщательного распределения добавок в смеси при перемешивании композиций.

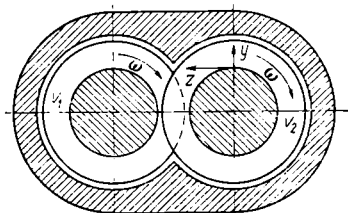
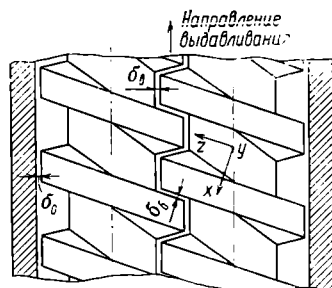
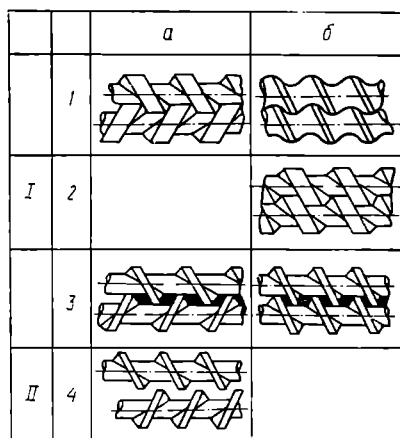


Рис. 4.30. Конструкции червяков двухчервячных экструдеров:

I — зацепляющиеся червяки; *II* — незацепляющиеся червяки; 1, 2 — плотное зацепление; 3 — неплотное зацепление; 4 — незацепляющиеся червяки; *a* — встречное вращение червяков; *б* — однонаправленное вращение червяков.

Рис. 4.31. Рабочие полости двухчервячного экструдера с зацепляющимися червяками. Пояснения в тексте.

4.2.2. Качественный анализ работы двухчервячных экструдеров

В двухчервячных экструдерах с зацепляющимися червяками винтовые каналы разбиты витками сопряженных червяков на отдельные С-образные секции объемом $V_1 = V_2 = V$ (рис. 4.31), заполненные расплавом полимера. За счет выжимающего действия витков сопряженного червяка перерабатываемый материал, который занимает полости объемом V_1 и V_2 , образованные боковыми поверхностями витков и цилиндрическими поверхностями сердечника червяка и охватывающего цилиндра, последовательно двумя рядами движется к формующему инструменту. При неизменной геометрии винтового канала (как правило, это справедливо для зоны выдавливания) характер поведения вязкой жидкости во всех С-образных секциях будет идентичным. Поэтому основным элементом при анализе работы двухчервячного экструдера является отдельная С-образная секция.

Авторы некоторых исследований исходят из предположения, что в случае полностью заполненных винтовых каналов червяков за один их оборот выдавливаются две С-образные секции расплава полимера. Такое упрощенное представление, естественно, приводит к значительному расхождению между расчетным и экспериментальным значениями производительности.

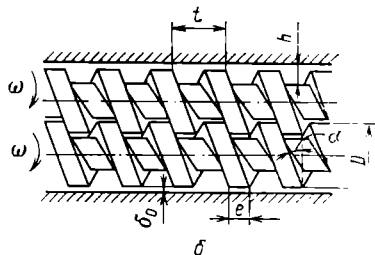
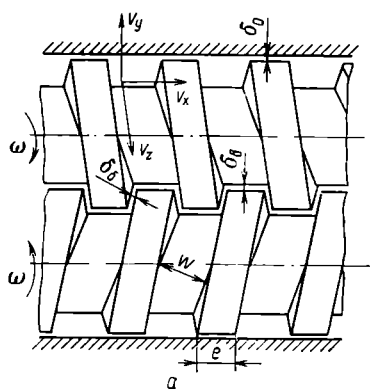


Рис. 4.32. Зацепление червяков двух-червячных экструдеров:
а — встречное вращение червяков; б — од-
нонаправленное вращение червяков.

Однако в реальных машинах необходимость обеспечения геометрической совместимости червяков предполагает наличие зазоров зацепления между сердечником и поверхностью выступов нарезки (δ_b) и боковыми поверхностями (δ_0) (рис. 4.32).

Наличие этих зазоров нарушает изолированность С-образных секций и приводит к развитию в продольном направлении винтового канала перетока перерабатываемого материала из одной секции в другую. Этот переток обусловлен, во-первых, затягивающим влиянием движущихся поверхностей сопряженных червяков и, во-вторых, наличием в зоне зацепления градиента давления, причиной возникновения которого является выжимающее действие витков второго червяка и сопротивление формирующего инструмента.

Величина перетока материала из одной С-образной секции в другую во многом зависит от степени ее замкнутости, т. е. от профиля нарезки, толщины гребня и частоты вращения червяков, следовательно, не весь материал, заключенный в С-образных секциях, выдавливается за каждый оборот червяков.

Существующие теории не освещают вопроса о поле скоростей и эпюрах давления в винтовых каналах червяков, что препятствует определению утечек через зазоры зацепления. Аналитические выражения скоростей потока и градиентов давления в винтовых каналах одночервячных экструдеров не могут быть механически использованы для анализа работы двухчервячных машин. В отличие от одночервячных машин градиент давления в винтовых каналах двухчервячных экструдеров с зацепляющимися червяками определяется в основном степенью замкнутости отдельных С-образных секций. Давление, необходимое для продавливания материала через формирующий инструмент, в двухчервячных экструдерах развивается на последних витках зоны выдавливания (дозирования).

Кроме того, предложенные уравнения производительности не учитывают конструкцию червяков и реологические свойства перерабатываемого материала. Попытки рассмотреть работу двухчервячных экструдеров без исследования процесса течения

перерабатываемого материала в винтовых каналах червяков и зазорах их зацепления приводят к неверным предпосылкам и, как следствие, к выводам, противоречащим экспериментальным данным. Знание гидродинамики потока вязкой жидкости в винтовых каналах и зазорах зацепления важно и с точки зрения изучения механизма смешения в двухчервячных экструдерах.

4.2.3. Эпюры скоростей потока вязкой жидкости и давления в винтовых каналах и зазорах зацепления червяков

Экспериментальные исследования продольной составляющей скорости потока проводились на модельном двухчервячном экструдере, корпус которого выполнен из прозрачного органического стекла (рис. 4.33).

Два комплекта червяков диаметром 40 мм, с шагом нарезки 16 мм, межцентровым расстоянием 32 мм и длиной нарезанной части 300 мм различались величиной бокового зазора δ_b , т. е. расстоянием между боковыми стенками нарезки обоих червяков. При определении действительных скоростей потока материала использовались червяки с зазором, не превышающим 0,25 мм.

При изучении распределения потоков перерабатываемого материала величина бокового зазора в зацеплении червяков равнялась 0,1 мм. Радиальный зазор δ_r был в обоих случаях постоянным и равным 1 мм. Привод экструдера позволял плавно, в широких пределах изменять частоту вращения червяков, а сменой коробки скоростей легко менялось направление вращения червяков со встречного на одностороннее. Давление варьировалось использованием капилляров различных диаметров.

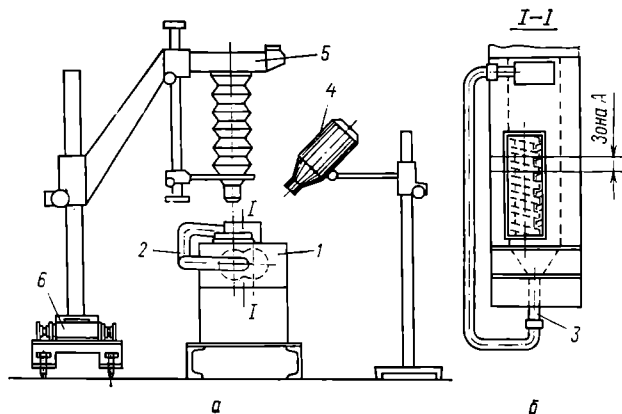


Рис. 4.33. Схема экспериментальной установки для исследования гидродинамики потока вязкой жидкости в двухчервячном экструдере:

а — общий вид установки; б — модельный двухчервячный экструдер; 1 — модельный двухчервячный экструдер; 2 — возвратный шланг; 3 — капилляр; 4 — фонарь; 5 — фотокамера с приставкой; 6 — подвижная платформа.

В качестве модельной жидкости, имитирующей течение расплава, были использованы растворы полиизобутилена в вазелиновом масле с вязкостью 45 Па·с (модельная жидкость № 1) и 300 Па·с (модельная жидкость № 2). В эти растворы были добавлены небольшие частицы алюминия (средним размером не более 0,05 мкм). Благодаря высокой вязкости модельной жидкости эти частицы не обнаруживали заметной тенденции к осаждению даже в неподвижной жидкости.

Насосный эффект экструдера позволил применить возвратную систему подачи раствора, т. е. жидкость, выйдя через капилляр, при помощи возвратного шланга вновь подавалась в загрузочное отверстие (рис. 4.33).

Для увеличения прозрачности стенки корпуса и уменьшения рефракционных ошибок на наружную поверхность корпуса было нанесено касторовое масло.

Поскольку оба червяка работают в одинаковых условиях, картина течения, наблюдаемая в винтовых каналах, будет аналогичной. Поэтому измерение скоростей производилось в осевой плоскости одного из червяков.

Сильный луч света от специального фонаря падал в винтовой канал. Частицы алюминия, отражая свет, становились хорошо видны. Зеркальная фотокамера с приставкой явилась своеобразной оптической системой, с помощью которой фиксировалась истинная скорость движения частиц. Ошибки, обусловленные оптической абберацией и кривизной траекторий, были незначительны, так как уменьшался путь, проходимый частицами. Его величина в процессе эксперимента равнялась 0,95 мм. Электрическим секундомером измерялось время прохождения частицами этого отрезка. Чтобы это время не было слишком мало, использовалась невысокая частота вращения червяков ($0,0472\text{--}0,0115\text{ с}^{-1}$).

При вращении червяков отдельные С-образные секции непрерывно, двумя рядами перемещаются от загрузочного отверстия к формующей головке. Поэтому для непрерывного измерения скорости частиц фотокамера с приставкой была укреплена на подвижной платформе, передвигающейся по направляющим параллельно оси червяка.

Профили скоростей определялись в зоне А, находящейся по длине в середине червяка (см. рис. 4.33). При этом предполагалось, что течение модельной жидкости в данной области наиболее свободно от влияния как загрузочной зоны, так и давления в головке.

При обработке результатов поперечное сечение канала ($w \times h = 8,2 \times 8,0$ мм) было разделено однородной системой плоскостей параллельно боковым стенкам — на расстоянии 2,7 мм, не считая поверхности дна и внутренней поверхности корпуса. В каждой плоскости по ширине и глубине канала производилось в среднем 5—8 замеров, из которых затем были вычислены действительные значения скоростей.

Режимы течения материала менялись как в результате использования капилляров различных диаметров (2,0; 4,2; 7,0 мм), так и при изменении частоты вращения червяков, т. е. для каждого диаметра капилляра профили скоростей определялись при различных частотах вращения червяков (0,061; 0,0777; 0,0115 с⁻¹ — для модельной жидкости № 1 и 0,0472; 0,06 с⁻¹ — для модельной жидкости № 2).

Кроме того, для модельной жидкости № 1 был использован режим нулевого расхода.

Система координат для отсчета скорости была расположена на внутренней поверхности корпуса. Ось y направлена к сердечнику червяка, ось x — перпендикулярно, а ось z — параллельно оси винтового канала в направлении к головке (см. рис. 4.32).

Каждое полученное значение действительной скорости было отнесено к скорости поверхности для канала. Таким образом, далее будут рассматриваться только относительные скорости. При графическом построении эпюр скорость дна канала принималась за единицу.

Изменение продольной скорости по глубине и ширине винтового канала для случая нулевого расхода и обычных режимов течения представлено на рис. 4.34. При выбранной системе наблюдения поступательное течение расплава, возникающее вследствие относительного движения червяка и стенки корпуса, создают дно и боковые стенки канала, которые перемещаются от головки к загрузочному отверстию. Градиент давления от выжимающего действия сопряженного витка, являющийся основным фактором, влияющим на движение материала к головке, направлен по оси z (в дальнейшем он будет называться положительным градиентом давления). При x/w , равном 0,34; 0,5 и 0,67, профиль кривой, описывающей эпюру скоростей, почти параболический, причем зоны прямого и обратного потоков хо-

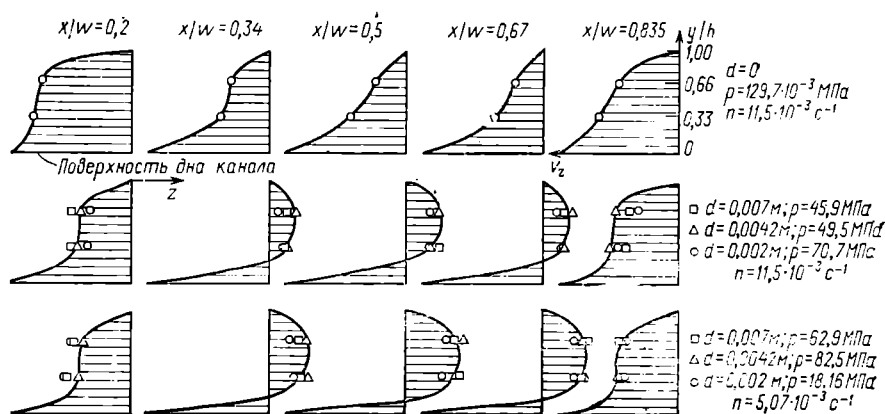


Рис. 4.34. Экспериментальные эпюры продольной составляющей v_z скорости циркуляционного потока в винтовом канале прямоугольной формы.

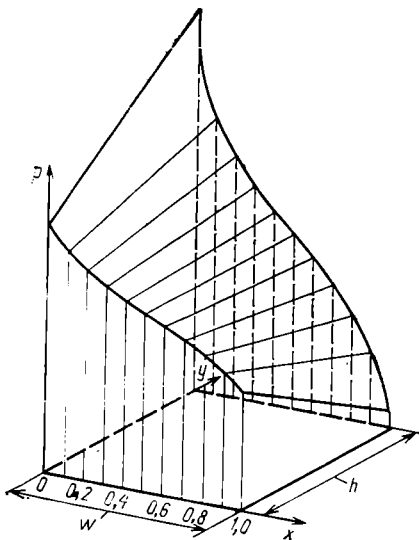
рошо видны. Обратное течение в данном случае создают дно и стенки канала. Прямое — положительный градиент давления. Максимальный положительный и минимальный обратный потоки наблюдаются в центральной плоскости канала ($x/w=0,5$, где x — координата по ширине канала). По мере удаления к стенкам влияние градиента давления уменьшается, а влияние вязкого трения возрастает.

Для плоскостей с координатами $x/w=0,2$ и $x/w=0,835$ о влиянии боковых стенок можно судить по форме кривой и площади, ограниченной эпюрой. Вязкость модельной жидкости не влияет на характер движения материала. На рис. 4.34 изображены профили скоростей для раствора полиизобутилена в вазелиновом масле, вязкость которого намного превышает вязкость глицерина. Тем не менее эпюры по всем продольным плоскостям не изменяются. Но при этом действие положительного градиента давления заметно возрастает. Это видно по увеличению площади той части эпюры, которая характеризует прямой поток.

Эксперименты показали, что изменение частоты вращения червяков не влияет на характер профиля скоростей. Рост давления в головке до определенного предела существенно не сказывается на течении материала. Только при диаметре капилляра $d=2$ мм его влияние становится заметным. Об этом можно судить по уменьшению прямого потока, так как площадь, характеризующая этот поток на эпюре скоростей, уменьшается. Следовательно, на течение материала в отдельной С-образной секции кроме выжимающего действия витка и вязкого течения определенное влияние оказывает и давление в головке. Возникающий при этом отрицательный градиент давления создает поток, направленный в сторону загрузочного отверстия, что приводит к ослаблению прямого потока. Наиболее ярко это иллюстрируется экстремальным случаем нулевого расхода, когда давление в головке максимально. Обратный поток под действием отрицательного градиента давления становится только немногим меньше, чем прямой поток, и течение материала в секции определяется в основном вязким трением. Однако такая картина наблюдается только при очень малых выходных отверстиях или в случае нулевого расхода.

Следует особо отметить, что приблизительно одинаковый характер течения сохраняется только в центральной области сечения, ограниченной плоскостями 2—4 (см. рис. 4.34). Это составляет только 33% от всей ширины канала. Далее по направлению от центра к периферии картина течения все больше искажается довольно существенным влиянием стенок. В связи с этим одномерная модель плоскопараллельного течения лишь очень приблизительно отражает сущность процесса, так как опытные данные показывают, что пренебрегать влиянием боковых стенок винтового канала в теоретических рассуждениях не следует.

Рис. 4.35. Экспериментальное распределение давления p в поперечном сечении винтового канала прямоугольной формы с $h/w=1,0$ при $N=0,667 \text{ с}^{-1}$.



В связи с технической трудностью определения непосредственно в винтовых каналах составляющих u_x и u_y поперечного циркуляционного потока, а также функции $p=p(x, y)$, их распределение изучалось на модельной установке, состоящей из вращающегося стакана (имитация цилиндра экструдера) с неподвижным хвостовиком внутри, представляющим нормальное сечение винтового канала червяка двухчервячного экструдера. В качестве

исследуемой жидкости использовался глицерин вязкостью $\eta=0,931 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

На рис. 4.35 в пространственной системе координат представлены соответствующие зависимости для прямоугольного канала с $h/w=1$, полученные при частоте вращения стакана $N=0,667 \text{ с}^{-1}$. При других частотах вращения стакана наблюдалась аналогичная картина. Из приведенных графиков видно, что:

а) изменение давления по высоте канала y/h во всем исследованном диапазоне при фиксированных значениях N носит линейный характер, т. е. $\partial p/\partial y = \text{const}$, но в то же время $\partial p/\partial y \neq 0$, за исключением случая $x/w=0,5$ (см. также рис. 4.34);

б) наблюдается изменение давления как по высоте (y/h), так и по ширине (x/w) канала, причем зависимость $p=p(y)$ имеет явно выраженный линейный характер, а функция $p=p(x)$ хотя и имеет слабо выраженный нелинейный характер, однако с небольшой погрешностью можно принять, что $\partial p/\partial x = \text{const}$ (см. рис. 4.35).

Экспериментальные данные по исследованию эпюр давления с достаточной точностью описываются эмпирическим уравнением вида

$$p(x, y) = \frac{y}{h} \operatorname{tg} \left[Nb_2 \left(\frac{x}{w} - \frac{1}{2} \right) \right] + N \operatorname{tg} \left[b_1 \left(\frac{x}{w} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (4.76)$$

где эмпирические коэффициенты b_1 и b_2 , зависящие от вязкости среды, могут быть определены из равенства нулю расхода поперечного циркуляционного потока.

На рис. 4.36 и 4.37 представлено распределение скоростей u_x и u_y по высоте y/h и ширине x/w канала с прямоугольным

поперечным сечением. Видно, что скорость v_x по высоте винтового канала меняет знак (см. рис. 4.36). Это объясняется тем, что движение цилиндра из-за наличия вязкого трения между слоями жидкости вызывает прямой поток, направление которого совпадает с направлением движения стенки цилиндра. С другой стороны, градиент давления, обусловленный набеганием потока на толкающую стенку винтового канала, вызывает поток под давлением (обратный поток), направленный в сторону, противоположную движению цилиндра. Кроме того, из-за влияния боковых стенок точки с нулевой скоростью по ширине канала x/w лежат в пределах $y/h=0,75 \div 0,85$. (Для одночервячных экструдеров, где $w \gg h$, значение координаты $y|_{v_x=0}=2/3h$.) В рассматриваемом случае это объясняется значительным влиянием боковых стенок канала на распределение скоростей.

Анализ распределения скоростей v_x по ширине канала (см. рис. 4.36) показывает, что максимальное значение скорости для всех N наблюдается при $x_w=0,5$. На участке $x/w=0 \div 0,5$, прилегающем к толкающей стенке, скорость v_x возрастает, а на участке $x/w=0,5 \div 1,0$, (пассивная стенка) наблюдается ее плавное уменьшение до нуля.

Вертикальная составляющая скорости потока v_y (см. рис. 4.37) меняется как по высоте y/h , так и по ширине x/w винтового канала, причем v_y до $y/h=0,5$ (середина высоты канала) плавно увеличивается, а затем монотонно уменьшается до нуля. При значении $x/w=0,5$ направление v_y изменяется. Смещение максимальных значений v_y к боковым стенкам канала объясняется увеличением градиента давления dp/du от $x/w=0,5$ к $x/w=0$ и $x/w=1$ (см. рис. 4.35), причем это смеще-

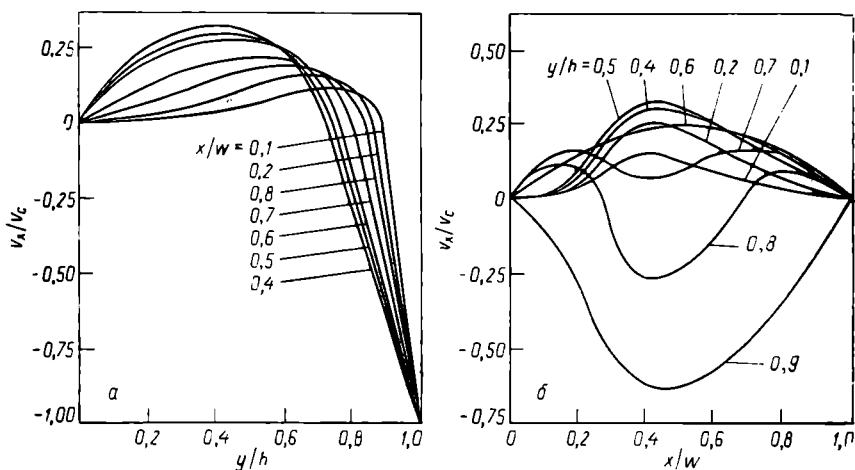


Рис. 4.36. Экспериментальные эпюры составляющей v_x/v_c скорости циркуляционного потока в винтовом канале прямоугольной формы ($h/w=1,0$):

а — по высоте канала; б — по ширине канала.

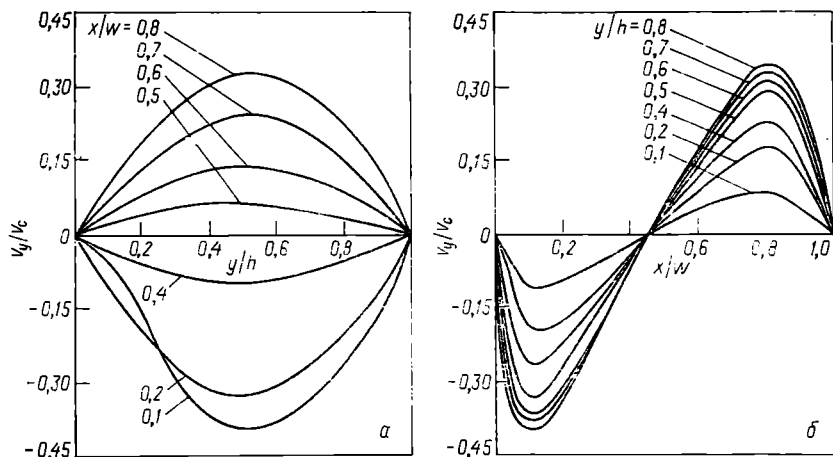


Рис. 4.37. Экспериментальные эпюры составляющей v_x/v_c скорости циркуляционного потока в винтовом канале прямоугольной формы ($h/w=1,0$):
а — по высоте канала; б — по ширине канала.

ние зависит от максимального значения dp/du для различных y/h . Максимальные значения v_y при различных y/h одинаково удалены от боковых стенок винтового канала. Это обусловлено тем, что градиент давления dp/du является функцией координаты x .

В связи с тем, что в промышленности переработки пластмасс применяются червяки не только с прямоугольным сечением винтового канала, проведены аналогичные исследования с червяками, имеющими трапецидальную форму нарезки с $h/w=1$. Характер распределения скоростей v_x и v_y по ширине x/w и высоте y/h исследуемого винтового канала оказался идентичным характеру распределения этих скоростей в канале с прямоугольным поперечным сечением. Анализ полученных данных показал, что распределение скоростей потока v_x и v_y согласуются с распределением давлений в указанном винтовом канале.

Экспериментальное исследование профиля скоростей в межвалковых зазорах зацепления червяков проводилось на установке, аналогичной примененной при исследовании распределения скоростей в самом винтовом канале. Единственное отличие заключалось в замене хвостовиков червяков с исследуемыми каналами на два вращающихся в прозрачном корпусе валка разных диаметров.

На рис. 4.38 представлены результаты экспериментальных исследований профиля скоростей v_{zv} и v_{yv} при встречном (в, г) и однонаправленном (а, б) вращении червяков, полученные при частоте $N=0,133 \text{ с}^{-1}$. Эксперименты при других частотах вращения дали идентичную картину распределения профиля скоростей.

Из приведенных эпюр скоростей видно, что как при встречном, так и при однонаправленном вращении червяков сильно развитое течение в направлении оси y (скорость v_{yb}) имеет место в конце С-образной секции винтового канала червяка. В самих валковых зазорах δ_b компонента v_{yb} скорости винтового потока появляется только вдоль оси x , проходящей через середину валкового зазора.

Компонента v_{zb} скорости потока, наоборот, наиболее сильно проявляется в самих валковых зазорах, а в собственно С-образной секции течение в направлении оси x имеет место только в области, прилегающей непосредственно к поверхности выступов (валки большого диаметра). В области, прилегающей к поверхности сердечника (валки малого диаметра) с координатой $x = \pm d/2$, значения $v_{zb} = 0$. При этом, если при встречном вращении червяков (см. рис. 4.38) скорости v_{zb} направлены в одну и ту же сторону, то при однонаправленном вращении скорости v_{zb} направлены в противоположные стороны. Компоненты v_{zb} скорости потока в основном и оказывает влияние на утечки из С-образной секции через межвалковый зазор.

В обоих случаях вращения червяков профили скоростей v_{zb} и v_{yb} формируются под действием двух факторов — относительных движений поверхностей валков (обуславливающих появление вынужденного потока) и градиентов давления как в межвалковом зазоре $[(\partial p/\partial z)_b, (\partial p/\partial y)_b]$, так и в самом винтовом канале $[(\partial p/\partial z)_k, (\partial p/\partial y)_k, (\partial p/\partial x)_k]$. При этом как v_{zb} , так и v_{yb} являются функциями координат z и y , т. е. $v_{zb} = v_{zb}(z, y)$ и $v_{yb} = v_{yb}(z, y)$.

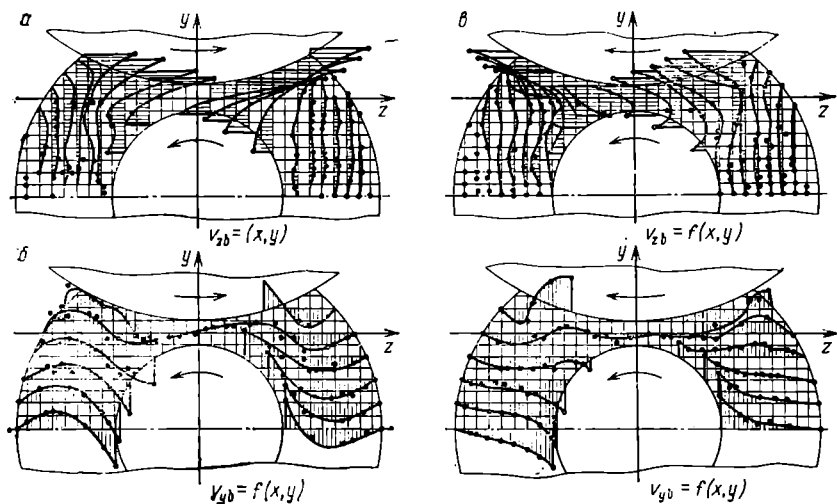


Рис. 4.38. Экспериментальные эпюры составляющих v_{yb} и v_{zb} скорости потока в «межвалковом» (радиальном) зазоре зацепления при однонаправленном (а, б) и встречном (в, г) вращении червяков ($N=0,133 \text{ с}^{-1}$).

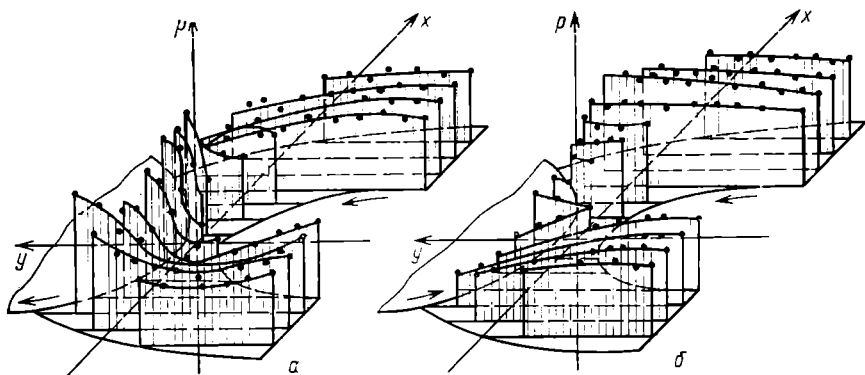


Рис. 4.39. Экспериментальное распределение давления в «межвалковом» (радиальном) зазоре зацепления при встречном (а) и однонаправленном (б) вращении червяков ($N=0,133 \text{ с}^{-1}$)

Эпюры скоростей v_{zv} и u_{yv} хорошо согласуются с картиной распределения давления в межвалковом зазоре зацепления червяков (рис. 4.39), полученном по методике, аналогичной методике замера давления в винтовых каналах.

Экспериментально найденные эпюры и профили скоростей потока в винтовом канале С-образной секции в межвалковых зазорах зацепления червяков намного облегчают анализ движения жидкости в двухчервячных экструдерах и процессов смешения в них перерабатываемого материала.

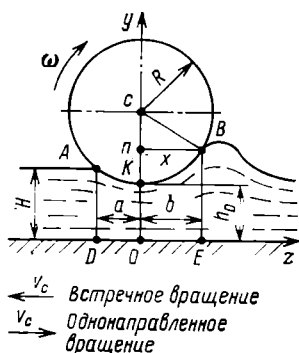
4.2.4. Теоретическое описание процессов течения в С-образных секциях винтовых каналов червяков и в зазорах зацепления

Распределение скорости потока в винтовых каналах С-образных секций. Процессы течения полимеров в винтовых каналах и в зазорах зацепления червяков двухчервячных экструдеров в настоящее время мало изучены. Недостаточность информации в этой области объясняется сложностью гидродинамических процессов, протекающих в двухчервячных экструдерах.

При решении рассматриваемой задачи использовались общепринятые допущения (несжимаемость жидкости, стационарность процесса, условия прилипаемости, пренебрежение инерционными и массовыми силами). Рассматривается изотермическая задача, а жидкость считается неньютоновской. Неньютоновский характер поведения материала учитывается при этом введением в исходные уравнения эффективной вязкости.

Экспериментальные исследования на реальных двухчервячных экструдерах с полимерами, показали, что между зонами загрузки и дозирования (выдавливания) имеются участки червяков, винтовые каналы которых не полностью заполнены рас-

Рис. 4.40. Модель течения расплава полимера в переходной зоне двухчервячного экструдера.



плавом. Это объясняется тем, что объем С-образной секции винтового канала в зоне загрузки выполняется большим, чем в зоне дозирования, а удельный объем полимера по мере его плавления уменьшается.

Участок червяков с неполностью заполненными винтовыми каналами (зона прокатки) вносит существенный вклад в суммарное смесительное воздействие двухчервячных экструдеров. В связи с этим необходимо его учесть при аналитическом описании процессов смешения.

Уравнение движения в этом случае с учетом принятых выше допущений будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial^2 v_{zn}}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta_n} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{\text{кп}} \quad (4.77)$$

Решая уравнение (4.77) при граничных условиях (рис. 4.40)

а) для встречного вращения червяков

$$\begin{aligned} y = 0; \quad a \leq z \leq b; \quad v_y = 0; \quad v_{zn} = -v_c = -\pi d N \cos \varphi \\ y = h; \quad -a \leq z \leq b; \quad v_y = -\omega z; \quad v_{zn} = \omega (h - h_0) \quad (4.78) \\ z = -a; \quad 0 \leq y \leq H; \quad \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{\text{кп}} = 0 \end{aligned}$$

б) для однонаправленного вращения червяков

$$\begin{aligned} y = 0; \quad -a \leq z \leq b; \quad v_y = 0; \quad v_{zn} = v_c = \pi d N \cos \varphi \\ y = h; \quad -a \leq z \leq b; \quad v_y = -\omega z; \quad v_{zn} = \omega (h - h_0) \quad (4.79) \\ z = -a; \quad 0 \leq y \leq H; \quad \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{\text{кп}} = 0 \end{aligned}$$

получим следующие выражения для скоростей v_{zn} :

а) при встречном вращении червяков

$$v_{zn}^a = \frac{1}{2\eta_n} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{\text{кп}} (y^2 - yh) + \omega \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) y + \pi d N \left(\frac{y}{h} - 1 \right) \quad (4.80)$$

б) при однонаправленном вращении червяков

$$v_{zn}^b = \frac{1}{2\eta_n} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{\text{кп}} (y^2 - yh) + \omega \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) + \pi d N \left(1 - \frac{y}{h} \right) \quad (4.81)$$

Для нахождения выражения $(\partial p / \partial z)_{\text{кп}}$ обратимся к уравнению неразрывности, имеющему в рассматриваемом случае вид

$$\frac{\partial v_{zn}}{\partial z} + \frac{\partial v_{yn}}{\partial y} = 0 \quad (4.82)$$

Беря от обеих частей этого уравнения интегралы по y в пределах от 0 до h и принимая во внимание условие (4.78) для $v_{yп}$, получим:

$$v_{yп} = \omega h = \int_0^h \frac{\partial v_{zп}}{\partial z} dy = \frac{\partial}{\partial z} \int_0^h v_{zп} dy - \omega (h - h_0) \frac{dh}{dz}$$

Интегрированием этого уравнения по z находим:

$$2 \int_0^h v_{zп} dy = \omega (z^2 + h^2 - 2h_0 h) + c \quad (4.83)$$

Совместным решением (4.76) и (4.83) с учетом последнего из условий (4.78) определяем постоянную интегрирования c :

$$-\frac{1}{6\eta_{п}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{кп} h^3 + \omega h^2 \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) - \pi d N h \cos \varphi = \omega (z^2 + h - 2h_0 h) + c$$

$$c = -\pi d N h \cos \varphi + \omega (h h_0 - a^2)$$

откуда

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{кп} = - \frac{6\eta_{п}\omega (z^2 - a^2)}{h^3} \quad (4.84)$$

Текущее значение h толщины слоя жидкости является функцией координаты z . Из рис. 4.40 видно, что

$$h = h_0 + R - \sqrt{R^2 - z^2} \quad (4.85)$$

Поэтому

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{кп} = - \frac{6\pi_{п}\omega (z^2 - a^2)}{(h_0 + R - \sqrt{R^2 - z^2})^3} \quad (4.86)$$

Нетрудно убедиться, что выражения для градиента давления $(\partial p / \partial z)_{кп}$ одинаковы для встречного и для однонаправленного вращения червяков. Величина $(\partial p / \partial z)_{кп}$ зависит только от угловой скорости ω и эффективной вязкости, определяемой отдельно для встречного и однонаправленного вращения червяков.

Для нахождения вертикальной составляющей $v_{yп}$ скорости потока в переходной зоне обратимся к уравнению неразрывности (4.82), из которого следует:

$$v_{yп} = - \int_0^y \frac{\partial v_{zп}}{\partial z} dy$$

Тогда при встречном вращении червяков

$$v_{yп} = \int_0^y \frac{\partial v_{zп}}{\partial z} dy = \frac{1}{2\eta_{п}} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right)_{кп} \left(\frac{y^3}{3} - \frac{y^2 h}{2} \right) -$$

$$- \frac{1}{4\eta_{п}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{кп} y^2 \frac{dh}{dz} + \frac{\omega h_0 y^2}{h^2} \frac{dh}{dz} - \frac{\pi d N y^2}{2h^2} \frac{dh}{dz} \quad (4.87)$$

а при однонаправленном вращении

$$v_{yп}^0 = - \int_0^y \frac{\partial v_{zп}}{\partial z} dy = \frac{1}{2\eta_{п}} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right)_{кп} \left(\frac{y^3}{3} - \frac{hy^2}{2} \right) - \\ - \frac{1}{4\eta_{п}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{кп} y^2 \frac{dh}{dz} + \frac{\omega hy^2}{2h^2} \frac{dh}{dz} + \frac{\pi d N y^2}{2h^2} \frac{dh}{dz}$$

где dh/dz и $(\partial^2 p / \partial z^2)_{кп}$ легко находятся из выражения (4.86).

В зоне дозирования двухчервячного экструдера С-образные секции винтовых каналов полностью заполнены расплавом полимеров. Распределение скоростей этих потоков можно найти, решив уравнения движения и неразрывности, которые с учетом принятых выше допущений принимают в рассматриваемом случае вид

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_к = 2\eta_{кс} \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \eta_{кс} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x \partial y} \right) \quad (4.89)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_к = 2\eta_{кс} \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \eta_{кс} \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x \partial y} \right) \quad (4.89)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_к = \eta_{кс} \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right) \quad (4.90)$$

$$\frac{\partial v_{xк}}{\partial x} + \frac{\partial v_{yк}}{\partial y} = 0 \quad (4.91)$$

Дифференцируя последнее уравнение по x и y и подставляя полученное выражение в (4.88) и (4.89), получим:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_к = \eta_{кс} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) \quad (4.92)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_к = \eta_{кс} \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) \quad (4.93)$$

Решение уравнения (4.90) применительно к двухчервячному экструдеру впервые получено Константиновым В. Н. [на основе экспериментальных исследований распределения давления по длине винтового канала С-образной секции им показано, что $(\partial p / \partial z)_к = \text{const}$] в виде

$$v_{zк} = 4DN \cos \varphi \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \frac{\text{sh} \left(\frac{2m+1}{\omega} \pi y \right)}{\text{sh} \left(\frac{2m+1}{\omega} \pi h \right)} \sin \left(\frac{2m+1}{\omega} \pi x \right) - \\ - \frac{\pi d N}{\cos \varphi} + \frac{1}{\eta_{кс}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_к \left\{ \frac{y^2}{2} - \frac{hy}{2} + \right. \\ \left. + \frac{4h^2}{\pi^3} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^3} \frac{\text{ch} [(2m+1) \pi (2x-\omega)]}{\text{ch} \left[\frac{(2m+1) \pi \omega}{2h} \right]} \sin \left(\frac{2m+1}{h} \pi y \right) \right\} \quad (4.94)$$

Первые два члена правой части уравнения (4.94) описывают распределение скорости вынужденного потока Q_d , обусловленного относительным движением поверхностей червяка и цилиндра, а последний член — распределение скорости потока Q_p под давлением от градиента давления $(\partial p / \partial z)_k$, возникающего в результате выжимающего действия витков сопряженного червяка и сопротивления формирующего инструмента.

Определение скоростей v_{xk} в поперечном направлении сводится к решению дифференциального уравнения (4.92) при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} x=0; \quad x=w; \quad 0 \leq y \leq h; \quad v_x=0 \\ y=0; \quad 0 \leq x \leq w; \quad v_x=0 \\ y=h; \quad 0 \leq x \leq w; \quad v_x=v_{cx} \end{aligned} \quad (4.95)$$

При решении указанного уравнения на основании экспериментальных данных принималось, что $(\partial p / \partial x)_k = \text{const}$. Тогда, решая уравнение (4.92) способом Фурье (метод разделения переменных), получим:

$$\begin{aligned} v_{xk} = \frac{4v_{cx}}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \frac{\text{sh} \left(\frac{2m+1}{w} \pi y \right)}{\text{sh} \left(\frac{2m+1}{w} \pi h \right)} \sin \left(\frac{2m+1}{w} \pi x \right) + \\ + \frac{1}{\eta_{kc}} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_k \left\{ \frac{y^2}{2} - \frac{yh}{2} + \right. \\ \left. + \frac{4h^2}{\pi^3} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^3} \frac{\text{ch} \left[\frac{(2m+1) \pi (2x-w)}{2h} \right]}{\text{ch} \left(\frac{2m+1}{2h} \pi w \right)} \sin \left(\frac{2m+1}{h} \pi y \right) \right\} \end{aligned} \quad (4.96)$$

где $v_{cx} = -\pi DN \cos \varphi$ — проекция скорости стенки цилиндра на ось x .

Величина $(\partial p / \partial x)_k$ определяется из равенства нулю поперечного циркуляционного потока:

$$\int_0^h v_x dy = 0 \quad (4.97)$$

Совместно решая уравнения (4.96) и (4.97), получим:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_k = - \frac{4D\pi N w \eta_{kc} \sin \varphi}{\pi} \frac{\sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(2m+1)^2} \frac{\text{ch} \left(\frac{2m+1}{w} \pi h - 1 \right)}{\text{sh} \left(\frac{2m+1}{w} \pi h \right)}}{-\frac{h^3}{12} + \frac{8h^3}{\pi^4} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^4} \frac{1}{\text{ch} \left(\frac{2m+1}{2h} \pi h \right)}} \end{aligned} \quad (4.98)$$

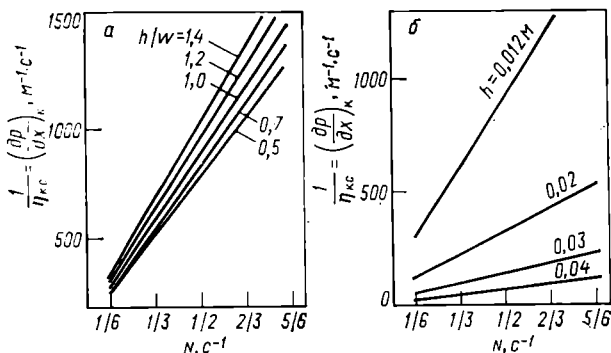


Рис. 4.41. Зависимость величины $\frac{1}{\eta_{\text{КС}}} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{\text{К}}$ от частоты вращения червяков N при различных значениях h/w (а) и h (б).

Уравнения (4.96) и (4.98) были приведены к более удобному для расчета на ЭВМ виду и просчитаны на машине БЭСМ-4 для различных значений N , h/w , y/h и x/w .

На рис. 4.41 представлены расчетные зависимости $\frac{1}{\eta_{\text{КС}}} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{\text{К}} = f(h, N)$ при $h/w = \text{const}$ и $\frac{1}{\eta_{\text{КС}}} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{\text{К}} = f\left(\frac{h}{w}, N\right)$ при $h = \text{const}$.

Полученные значения комплекса $\frac{1}{\eta_{\text{КС}}} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{\text{К}}$ подставлялись в уравнение (4.96) для нахождения значений v_x . В качестве примера на рис. 4.42 представлены расчетные эпюры скоростей v_x для $N=0,283 \text{ с}^{-1}$, $h=0,012 \text{ м}$, $h/w=1$, причем их идентичность распределению скоростей, полученных экспериментально, очевидна, следовательно, предположение о постоянстве градиента давления $(\partial p / \partial x)_{\text{К}}$ вполне оправдано.

Наличие поперечной циркуляции жидкости предполагает существование вертикальной составляющей v_y скорости потока. Теоретическое распределение скорости v_y можно было бы получить решением уравнения (4.98). Однако неявность вида функций $(\partial p / \partial y)_{\text{К}} = f(x, y)$ делает невозможным аналитическое решение указанного уравнения. Поэтому профиль скорости v_y находился численным методом (методом конечных разностей) решения уравнения (4.93) с помощью ЭВМ (рис. 4.43).

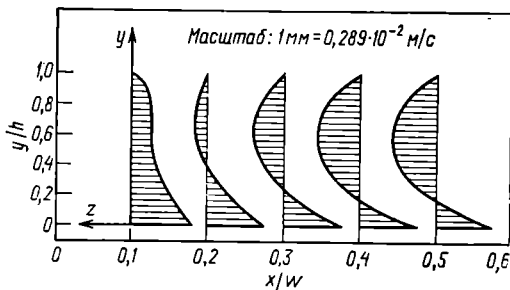


Рис. 4.42. Расчетные эпюры поперечной скорости v_x ($h=0,012 \text{ м}$; $h/w=1,0$).

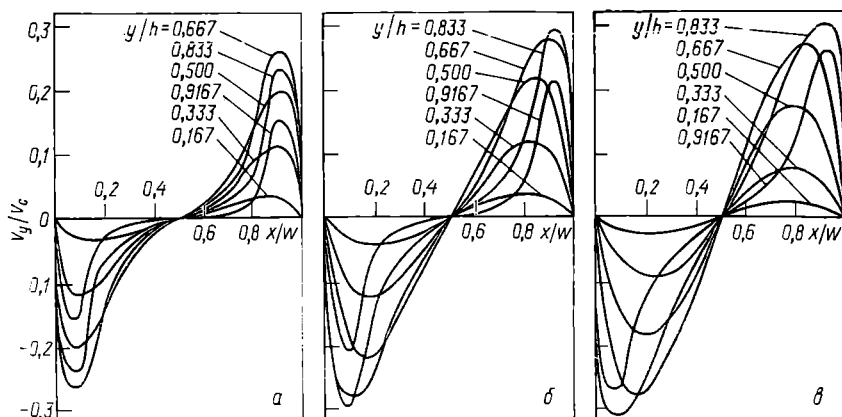


Рис. 4.43. Теоретические эпюры составляющей v_y/v_c скорости циркуляционного потока в винтовых каналах прямоугольной формы с различным отношением h/w :

а — 0,4; б — 0,6; в — 1,0.

Распределение скоростей потоков утечек в зазорах зацепления червяков двухчервячных экструдеров. Условие геометрической совместимости предполагает обязательное наличие зазоров зацепления — боковых, или аксиальных δ_b и межвалковых, или радиальных δ_b (см. рис. 4.32).

Выражение для профиля скоростей потока в межвалковых зазорах зацепления червяков можно найти из решения дифференциального уравнения движения, имеющего в данном случае вид

$$\frac{\partial^2 v_{zb}}{\partial y^2} = -\frac{1}{\eta_b} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_b \quad (4.99)$$

Решая дифференциальное уравнение (4.99) при граничных условиях (рис. 4.44, а)

а) при встречном вращении червяков

$$\begin{aligned} y = \delta_1; & \quad v_{zb} = \omega R_1 \\ y = -\delta_2; & \quad v_{zb} = \omega R_2 \end{aligned}$$

б) при однонаправленном вращении червяков

$$\begin{aligned} y = \delta_1; & \quad v_{zb} = -\omega R_1 \\ y = -\delta_2; & \quad v_{zb} = \omega R_2 \end{aligned}$$

получим:

а) для встречного вращения червяков

$$\begin{aligned} v_{zb} = & \frac{1}{2\eta_b} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_b [\delta_1 \delta_2 - y^2 + (\delta_1 - \delta_2) y] + \\ & + \frac{\omega}{\delta} [(R_1 - R_2) y + R_1 \delta_2 + R_2 \delta_1] \end{aligned} \quad (4.100)$$

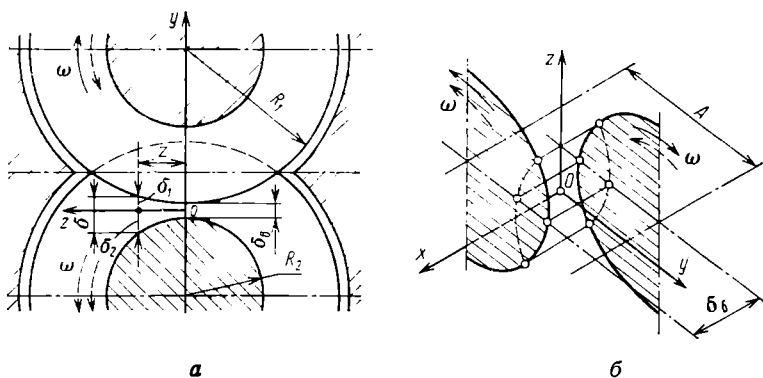


Рис. 4.44. К определению скоростей потока $v_{z\pi}$ в валковом зазоре (а) и $v_{z\delta}$ в боковом зазоре (б).

б) для однонаправленного вращения червяков

$$v_{z\pi}^0 = \frac{1}{2\eta_{\pi}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{\pi} [\delta_1 \delta_2 - y^2 - (\delta_2 - \delta_1) y] + \omega \left[\frac{R_1 + R_2}{\delta} (y - \delta_1) + R_1 \right] \quad (4.101)$$

Величины δ , δ_1 и δ_2 являются функциями координаты z .

Наряду с межвалковыми δ_{π} существенное влияние на производительность и процесс смешения в двухчервячных экструдерах оказывают боковые зазоры δ_6 .

Решением дифференциального уравнения

$$\frac{\partial^2 v_{z\delta}}{\partial x^2} = -\eta_6 \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_6 \quad (4.102)$$

при граничных условиях (рис. 4.44, б)

а) для встречного вращения червяков

$$\begin{aligned} x &= \delta_6/2; & v_{z\delta} &= \omega (A/2 + y) \\ x &= -\delta_6/2; & v_{z\delta} &= \omega (A/2 - y) \end{aligned}$$

б) для однонаправленного вращения червяков

$$\begin{aligned} x &= \delta_6/2; & v_{z\delta} &= \omega (A/2 + y) \\ x &= -\delta_6/2; & v_{z\delta} &= -\omega (A/2 - y) \end{aligned}$$

получим следующее выражение для $v_{z\delta}$:

а) для встречного вращения червяков

$$v_{z\delta}^0 = \frac{1}{2\eta_6} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_6 \left(\frac{\delta_6^2}{4} - x^2 \right) + \omega \left(\frac{2yx}{\delta_6} + \frac{A}{2} \right) \quad (4.103)$$

б) для однонаправленного вращения червяков

$$v_{z\delta}^0 = -\frac{1}{2\eta_6} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_6 \left(x^2 - x\delta_6 + \frac{\delta_6^2}{4} \right) + \omega \left(\frac{Ax}{\delta_6} + y \right) \quad (4.104)$$

Обычно межосевое расстояние червяков A и боковой зазор b_6 являются заданными величинами (при известной геометрии червяков). Поэтому единственным неизвестным в уравнениях (4.103) и (4.104) является градиент давления $(\partial p / \partial z)_6$ в боковых зазорах. Методика расчета $(\partial p / \partial z)_6$ приведена в следующем разделе.

4.2.5. Вывод уравнений для расчета производительности двухчервячных экструдеров со встречным и однонаправленным вращением червяков

Впервые уравнение для расчета теоретической производительности двухчервячных экструдеров было предложено Г. Шенкелем в виде

$$Q_{\max} = iN(2\pi - \varphi')(\pi D \operatorname{tg} \varphi - e)(D - h)h \quad (4.105)$$

где D , t , h , φ — наружный диаметр, шаг нарезки, глубина и угол подъема винтового канала соответственно; i — число заходов винтового канала; N — частота вращения червяка.

Уравнение (4.105) определяет производительность двухчервячного экструдера для крайнего случая, когда С-образные секции винтовых каналов полностью изолированы друг от друга, и выражает следующий физический смысл: весь материал, заполняющий объем С-образной секции, выдавливается из каждого червяка за один оборот. Однако условие соблюдения геометрической совместимости червяков обуславливает необходимость зазоров их зацепления и, как следствие, отсутствие изолированности С-образных секций. Наличие же сопротивления формующего инструмента, на выходе из которого устанавливается давление p_r , выжимающего действия витков сопряженного червяка, а также относительного давления стенок винтовых каналов и цилиндра является причиной возникновения потоков утечек через зазоры зацепления червяков.

Анализ рабочих характеристик двухчервячного экструдера показал, что действительная его производительность Q_d намного меньше теоретической $Q_{\max}$, рассчитанной по формуле (4.105) (рис. 4.45).

Разность $Q_{\max} - Q_{p_p=0} = \Delta Q_c$ соответствует потоку утечек, образующихся в результате наличия перепада давления в С-образных секциях от выжимающего действия витков сопряженного червяка и относительного движения поверхностей канала в цилиндре, а разность $Q_{p_d=0} - Q_w = \Delta Q_{p_d}$ — потоку утечек, обусловленных сопротивлением головки.

Таким образом, действительная производительность двухчервячного экструдера равна

$$Q_d = Q_{\max} - \Delta Q_{p_d} - \Delta Q_c \quad (4.106)$$

Поток жидкости из С-образных секций, обусловленный выжимающим действием витков сопряженного червяка, зависит

Рис. 4.45. Рабочая характеристика двухчервячного экструдера.

только от плотности κ_3 их зацеплений, характеризующей степень замкнутости указанных секций. Причиной возникновения потоков утечек через зазоры зацепления служит наличие градиента давления $(\partial p / \partial z)_\kappa$ вдоль винтового канала, являющегося результатом действия двух факторов — замыкания винтового канала сопрягающим червяком и сопротивления течению материала в формирующем инструменте (головке). Виток, замыкающий винтовой канал, развивает вдоль него градиент давления $(\partial p / \partial z)_{\kappa c}$, а от сопротивления формирующего инструмента возникает градиент давления $(\partial p / \partial z)_{\kappa d}$, направление которого противоположно направлению $(\partial p / \partial z)_{\kappa c}$. Величина $(\partial p / \partial z)_{\kappa d}$ не постоянна. Наиболее резкое падение давления происходит в зоне сопряжения червяков. Влияние давления в формирующем инструменте сказывается на суммарном градиенте давления $(\partial p / \partial z)_\kappa$, являющемся алгебраической суммой $(\partial p / \partial z)_{\kappa c}$ и $(\partial p / \partial z)_{\kappa d}$:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_\kappa = \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{\kappa c} + \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{\kappa d} \quad (4.107)$$

Оно зависит от степени замкнутости С-образных секций, характеризуемой коэффициентом κ_3 плотности зацепления червяков.

Наличие потоков утечек через зазоры зацепления является причиной того, что действительная производительность двухчервячного экструдера намного меньше максимальной, рассчитываемой по формуле (4.105).

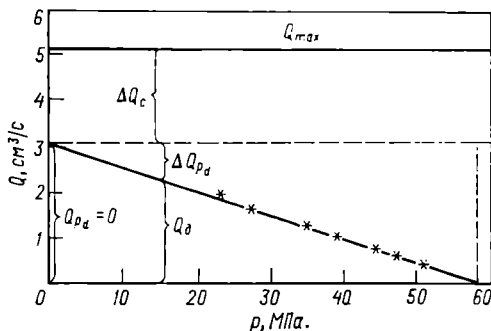
В. Н. Константинов предложил следующую формулу для расчета производительности двухчервячных экструдеров, учитывающую потоки утечек через зазоры зацепления:

$$Q_d = Q_{\max} + Q_c + Q_{p_d} \quad (4.108)$$

где $Q_{\max}$ — максимальная производительность экструдера (без учета расхода утечек); Q_c — суммарный поток утечек из С-образных секций; Q_{p_d} — поток утечек через радиальный зазор δ_0 между поверхностями цилиндра и гребня нарезки, обусловленный сопротивлением головки.

Для расчета суммарного потока утечек Q_c В. Н. Константинов предлагает следующее уравнение:

$$Q_c = 2i \int_0^w \int_0^h v_z dx dy$$



Подстановкой v_z [см. уравнение (4.94)] и последующим интегрированием он получил:

$$Q_c = -2\pi h (t - ie) \left[D \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{2} F_d F_c \right) - h \right] N - \frac{h^3 (t - ie) F_p \cos \varphi}{6\eta_{kc}} \quad (4.109)$$

Коэффициенты F_d , F_p , F_c , учитывающие влияние боковых стенок и кривизны винтового канала на течение жидкости, рассчитываются по формулам

$$F_d = \frac{16\omega}{\pi^3 h} \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2m+1)^3} \operatorname{th} \left(\frac{2m+1}{2\omega} \pi h \right) \right] \quad (4.110)$$

$$F_p = 1 - \frac{192h}{\pi^5 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2m+1)^5} \operatorname{th} \left(\frac{2m+1}{2h} \pi \omega \right) \right] \quad (4.111)$$

$$F_c = \frac{D}{2h} - \frac{\ln \frac{1}{1-2h/D}}{\frac{h}{D} \left[\left(\frac{1}{1-2h/D} \right)^2 - 1 \right]} \quad (4.112)$$

Однако отсутствие аналитического выражения для $(\partial p / \partial z)_k$ намного снижает ценность уравнения для расчета потоков утечек через зазоры зацепления червяков и делает невозможным его применение при расчете производительности двухчервячных экструдеров.

Утечки в радиальном зазоре δ_0 могут рассматриваться как расход Q_{p_d} через плоскую щель шириной $(\pi - 2 \arccos \frac{A}{D}) D / \cos \varphi$, длиной l и высотой δ_0 :

$$Q_{p_d} = \frac{-\left(\pi - 2 \arccos \frac{A}{D} \right) D \delta_0^3}{6\eta_{\delta_0} \cos \varphi} \frac{\Delta p_d}{L_{dz}} \quad (4.113)$$

где A — межосевое расстояние червяков; L_{dz} — длина зоны дозирования; Δp_d — перепад давления в головке; η_{δ_0} — эффективная вязкость в кольцевом зазоре δ_0 .

С учетом того, что ширина и длина щели намного больше ее высоты δ_0 , уравнение (4.113) достаточно точно описывает расход утечки через радиальный зазор δ_0 . Таким образом, единственным, что препятствует расчету производительности двухчервячных экструдеров, является отсутствие аналитического выражения для градиента давления $(\partial p / \partial z)_k$ вдоль винтового канала. Для его определения рассмотрим отдельно потоки утечек через боковые и межвалковые зазоры зацепления червяков при их однонаправленном и встречном вращении. При этом боковые зазоры рассматриваются как плоская щель длиной l_6 , шириной $h - \delta_a$ и высотой δ_6 .

Тогда поток утечек через каждый боковой зазор δ_6 равен (см. рис. 4.32)

$$Q_6 = \int_{-\frac{h-\delta_B}{2}}^{+\frac{h-\delta_B}{2}} \int_{-\frac{\delta_6}{2}}^{+\frac{\delta_6}{2}} v_{z6} dx dy \quad (4.114)$$

С учетом выражения (4.103) для v_{z6} и при последующем интегрировании получим следующее уравнение для расчета расхода утечек через боковой зазор при встречном вращении червяков:

$$\begin{aligned} Q_{fB} &= \int_{-\frac{h-\delta_6}{2}}^{+\frac{h-\delta_6}{2}} \int_{-\frac{\delta_6}{2}}^{+\frac{\delta_6}{2}} v_{z6} dx dy = \\ &= \frac{1}{12\eta_{6B}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{KB} \frac{l_s}{l_6} (h - \delta_B) \delta_6^3 + \frac{\omega A \delta_6}{2} (h - \delta_B) \end{aligned} \quad (4.115)$$

Подстановкой (4.104) в (4.115) и последующим интегрированием получим следующее выражение для расхода потока утечек через боковой зазор при однонаправленном вращении червяков:

$$Q_{60} = \int_{-\frac{h-\delta_B}{2}}^{+\frac{h-\delta_B}{2}} \int_{-\frac{\delta_6}{2}}^{+\frac{\delta_6}{2}} v_{z6} dx dy = \frac{1}{12\eta_{60}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{KO} \frac{l_s}{l_f} (h - h_B) \delta_6^3 \quad (4.116)$$

В выражениях (4.115) и (4.116) $\omega = 2\pi N$; l_6 , l_s — длина бокового зазора и винтового канала С-образной секции; η_{6B} , η_{60} — эффективная вязкость в боковых зазорах при встречном и однонаправленном вращении червяков.

Из рассмотрения геометрии зацепления легко можно найти, что

$$l_s = \pi (D - h) - \frac{D}{2} \arccos \left[\frac{A^2 - \left(\frac{D-h}{2} \right)^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2}{AD} \right] \quad (4.117)$$

$$l_6 = \frac{D}{2} \arccos \left[\frac{A^2 - \left(\frac{D-h}{2} \right)^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2}{AD} \right] \quad (4.118)$$

Поток утечек через валковый зазор шириной $(\omega/\cos \varphi - 2\delta_6)$ определяется из соотношения (см. рис. 4.32)

$$Q_B = \left(\frac{\omega}{\cos \varphi} - 2\delta_6 \right) \int_{-\delta_2}^{\delta_1} v_{zB} dy \quad (4.119)$$

Подставляя выражение (4.98) для v_{zv}^a и интегрируя, получим, что при встречном вращении червяков поток утечек через валковый зазор равен

$$Q_{zv} = \frac{\frac{\omega}{\cos \varphi} - 2\delta_6}{12\eta_{zv}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{kv} \frac{l_s}{l_b} \delta^3 + \frac{\frac{\omega}{\cos \varphi} - 2\delta_6}{2} \omega \delta (R_1 + R_2) \quad (4.120)$$

Поток утечек через межвалковый зазор при одностороннем вращении червяков получим, если в уравнение (4.119) введем выражение (4.101) для v_{zo}^o и проинтегрируем его по y :

$$Q_{zo} = \left(\frac{\omega}{\cos \varphi} - 2\delta_6 \right) \frac{1}{2\eta_{zo}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{ko} \frac{l_s}{l_b} f_1 + \left(\frac{\omega}{\cos \varphi} - 2\delta_{6o} \right) \omega \frac{\delta}{2} (R_1 - R_2) \quad (4.121)$$

где $\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_b = \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_k \frac{l_s}{l_b}$; l_b — длина межвалкового зазора, которая опреде-

ляется при анализе экспериментального распределения скоростей потока в межвалковом зазоре; $l_b \approx D - 2h$ (эксперименты с жидкостями, вязкости которых отличались друг от друга в 2 раза, показали одно и то же значение l_b — длины участка, на котором наблюдалось течение, направленное в межвалковый зазор); $\delta = \delta_1 + \delta_2$ — толщина зазора в произвольном сечении оси z (см. рис. 4.44, а);

$$f_1 = \frac{\delta_1^3 + \delta_2^3}{6} + \frac{\delta_1^2 \delta_2 + \delta_1 \delta_2^2}{2};$$

$$\delta_1 = \frac{D + \delta_b}{2} - \frac{(D - h - \delta_b)^2 - \left(\frac{D - h}{2} \right)^2 + \left(\frac{D}{2} \right)^2}{2(D - h + h_b)};$$

$$\delta_2 = \frac{D - 2h + \delta_b}{2} -$$

$$- \sqrt{\left(\frac{D - 2h}{2} \right)^2 - \left[\frac{D^2}{4} - \frac{(D - h + \delta_b)^2 \left(\frac{D - h}{2} \right)^2 \left(\frac{D}{2} \right)^2}{2(D - h + \delta_b)} \right]}$$

R_1, R_2 — радиусы выступа нарезки и сердечника червяка; $R_1 = D/2$; $R_2 = (D - 2h)/2$; η_{zv}, η_{zo} — эффективная вязкость в межвалковом зазоре при встречном и однонаправленном вращении червяков.

С учетом того, что конец каждой С-образной секции сообщается с другими секциями посредством двух боковых и одного межвалкового зазоров, а за каждый оборот червяков выдавливаются объемы двух С-образных секций, суммарный поток утечек через зазоры зацепления равен:

а) при встречном вращении червяков

$$Q_{св} = 4Q_{бв} + 2Q_{вв} = \frac{1}{3\eta_{бв}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{кв} \frac{l_s}{l_b} (h - \delta_b) \delta_b^3 + \\ + 2\omega A \delta_b (h - \delta_b) + \left(\frac{\omega}{\cos \varphi} - 2\delta_b \right) \omega \delta (R_1 + R_2) + \\ + \frac{\frac{\omega}{\cos \varphi} - 2\delta_b}{6\eta_{вв}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{кв} \frac{l_s}{l_b} \delta^3 \quad (4.122)$$

б) при однонаправленном вращении червяков

$$Q_{сo} = 4Q_{бo} + 2Q_{вo} = \frac{1}{3\eta_{бo}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{ко} \frac{l_s}{l_b} (h - \delta_b) \delta_b^3 + \\ + \frac{\frac{\omega}{\cos \varphi} - 2\delta_b}{\eta_{вo}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{ко} \frac{l_s}{l_b} f_1 + \left(\frac{\omega}{\cos \varphi} - 2\delta_b \right) \omega \delta (R_1 + R_2) \quad (4.123)$$

Из очевидных соотношений $Q_c = Q_{св}$ и $Q_c = Q_{сo}$ с учетом (4.109), (4.122), (4.123) можно найти выражения для градиентов давления $(\partial p / \partial z)_{кв}$ и $(\partial p / \partial z)_{ко}$ при встречном и однонаправленном вращении червяков:

а) при встречном вращении червяков

$$-2\pi h (t - ie) \left[D \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{2} F_d F_c \right) - h \right] N - \\ - \frac{h^3 (t - ie) F_p \cos \varphi}{6\eta_{кв}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{кв} = \frac{1}{3\eta_{бв}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{кв} \frac{l_s}{l_b} (h - h_b) \delta_b^3 + \\ + 2\omega A \delta_b (h - \delta_b) + \frac{B}{6\eta_{вв}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{кв} \frac{l_s}{l_b} \delta^3 + B\omega \delta (R_1 + R_2) \quad (4.124)$$

откуда градиент давления $(\partial p / \partial z)_{кв}$ равен

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{кв} = \\ = \frac{-\pi h (t - ie) \left[D \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{2} F_d F_c \right) - h \right] N - B\omega \delta (R_1 + R_2) - 2\omega A \delta_b (h - \delta_b)}{\frac{B}{6\eta_{вв}} \frac{l_s}{l_b} \delta^3 + \frac{1}{3\eta_{бв}} \frac{l_s}{l_b} (h - \delta_b) \delta_b^3 - \frac{h^3 (t - ie) F_p \cos \varphi}{6\eta_{кв}}} \quad (4.125)$$

[в выражениях (4.124) и (4.125) $\eta_{кв}$, $\eta_{ко}$ означают эффективную вязкость в винтовом канале при встречном и одностороннем их вращении]

б) при однонаправленном вращении червяков

$$-2\pi h (t - ie) \left[D \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{2} F_d F_c \right) - h \right] N - \frac{h^3 (t - ie) F_p \cos \varphi}{6\eta_{ко}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{ко} = \\ = \frac{1}{3\eta_{бo}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{ко} \frac{l_s}{l_b} (h - \delta_b) \delta_b^3 + \frac{\frac{\omega}{\cos \varphi} - 2\delta_b}{\eta_{вo}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{ко} \frac{l_s}{l_b} f_1 + \\ + (\frac{\omega}{\cos \varphi} - 2\delta_b) \omega \delta (R_1 - R_2)$$

откуда градиент давления $(\partial p / \partial z)_{\text{ко}}$ вдоль винтового канала равен

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{\text{ко}} = \frac{-2\pi h (t - ie) \left[D \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{2} F_d F_c \right) - h \right] N - B \omega \delta (R_1 - R_2)}{\frac{1}{3\eta_{\text{бо}}} \frac{l_s}{l_6} (h - \delta_b) \delta_0^3 + \frac{B}{\eta_{\text{бо}}} \frac{l_s}{l_b} f_1 + \frac{h^3 (t - ie)}{6\eta_{\text{ко}}} F_p \cos \varphi} \quad (4.126)$$

Согласно (4.106) с учетом выражений (4.105), (4.109), (4.113), (4.125) и (4.126), получим следующее уравнение для расчета производительности двухчервячных экструдеров со встречным и однонаправленным вращением червяков:

$$\begin{aligned} Q_{\text{дв}} = & iN (2\pi - \varphi') (\pi D \operatorname{tg} \varphi - e) - 2\pi h (t - ie) \times \\ & \times \left[D \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{2} F_d F_c \right) - h \right] N - \frac{h^3 (t - ie) F_p \cos \varphi}{6\eta_{\text{кв}}} \times \\ & \times \frac{-2\pi h (t - ie) \left[D \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{2} F_d F_c \right) - h \right] N - 2\omega A [B\delta (R_1 + R_2) + \delta_0 (h - \delta_b)]}{\frac{B}{6\eta_{\text{бв}}} \frac{l_s}{l_b} \delta_0^3 + \frac{1}{3\eta_{\text{бв}}} \frac{l_s}{l_6} (h - \delta_b) \delta_0^3 + \frac{h^3 (t - ie) F_p \cos \varphi}{6\eta_{\text{кв}}}} - \\ & - \frac{\left(\pi - 2 \arccos \frac{A}{D} \right) D \delta_0^3}{6\eta_{\delta_0} \cos \varphi} \frac{\Delta p_d}{L_{dz}} \end{aligned} \quad (4.127)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{до}} = & iN (2\pi - \varphi') (\pi D \operatorname{tg} \varphi - e) (D - h) - 2\pi h (t - ie) \\ & \times \left[D \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{2} F_d F_c \right) - h \right] - \frac{h^3 (t - ie) F_p \cos \varphi}{6\eta_{\text{ко}}} \times \\ & \times \frac{-2\pi h (t - ie) \left[D \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{2} F_d F_c \right) - h \right] N - B \omega \delta (R_1 - R_2)}{\frac{1}{3\eta_{\text{бо}}} \frac{l_s}{l_6} (h - \delta_b) \delta_0^3 + \frac{B}{\eta_{\text{бо}}} \frac{l_s}{l_b} f_1 + \frac{h^3 (t - ie)}{6\eta_{\text{ко}}} F_p \cos \varphi} - \\ & - \frac{\left(\pi - 2 \arccos \frac{A}{D} \right) D \delta_0^3}{6\eta_{\delta_0} \cos \varphi} \frac{\Delta p_d}{L_{dz}} \end{aligned} \quad (4.128)$$

В формулах (4.124) — (4.128) $B = \omega / \cos \varphi - 2\delta_0$.

Таким образом, производительность двухчервячных экструдеров при известных геометрии червяка и вязкостных свойствах перерабатываемого материала легко рассчитывается.

Основным конструктивным элементом двухчервячных экструдеров являются червяки, размеры которых (диаметр червяка D и его длина L) являются определяющими при выборе мощности привода и мощности нагревательных элементов. Производительность двухчервячных экструдеров зависит, как было показано

выше, от геометрии червяка и его зацепления. При проектировании двухчервячных экструдеров производительность, мощность привода и нагревательных элементов выбираются эмпирическим путем на основе анализа многочисленных экспериментальных данных.

Двухчервячные экструдеры в настоящее время выпускаются всеми высокоразвитыми странами (СССР, США, ФРГ, ГДР, Италия, Япония, Франция, Англия и др.). При равенстве диаметров червяки, независимо от фирм-изготовителей, мало отличаются по своим техническим характеристикам. Поэтому, обработав показатели технических характеристик двухчервячных экструдеров, выпускаемых разными странами, получим следующие уравнения, позволяющие быстро и с достаточной для инженерных расчетов точностью определить производительность и мощность привода:

производительность двухчервячных экструдеров (кг/ч)

$$Q_d = K_d D^{c_d} \quad (4.129)$$

где D — диаметр червяков, мм; $K_d = 3,64 \cdot 10^{-2}$; $c_d = 2$;

установленная мощность привода (кВт)

$$P_d = K_N D^{c_N} \quad (4.130)$$

где $K_N = 5,25 \cdot 10^{-3}$; D — диаметр червяков, мм; $c_N = 1,84$.

4.2.6. Технология экструзии в двухчервячных экструдерах

В зависимости от задач переработки (получение полуфабрикатов, изделий, диспергирование или смешение) выбираются параметры переработки (частота вращения червяков, направление их вращения, температурный режим, термостатирование червяков) и оцениваются конструктивные возможности (геометрия червяков — угол подъема при постоянной глубине винтового канала, боковые и межвалковые зазоры, наличие отбойных витков, блоков смесительных элементов, правосторонняя или левосторонняя нарезка, длина червяков, конструкция цилиндра, функциональные зоны).

Однако путем изменения геометрических размеров, а также конструкции сегментов червяков (или отдельных участков) могут быть достигнуты весьма различные условия воздействия силовых факторов на перерабатываемый материал.

При заданном материале и известной его сыпучести, имея сведения о процессах плавления полимера, хотя бы исходя из экспериментальных исследований на одночервячных экструдерах (скорость плавления, изменение объема по $P-V-T$ -диаграмме) можно с помощью упомянутой кривой изменения объема достичь удовлетворительного проектирования зон двухчервячного экструдера. Геометрическая степень сжатия для двух-

червячного экструдера рассчитывается по формуле

$$K_c = \frac{2\pi (t_1 - ie_{1m}) (D^2 - d^2) - 8kF_1 t_1}{2\pi (t_2 - ie_{2m}) (D^2 - d^2) - 8kF_2 t_2} \quad (4.131)$$

где индексы «1» и «2» относятся к началу и концу участка червяков; t — шаг винтовой нарезки; i — число заходности нарезки; e_m — ширина гребня нарезки по среднему диаметру; k — число зацеплений; F — площадь поверхности сегмента зацепляющихся червяков; D , d — наружный диаметр и диаметр сердечника червяка.

Большое влияние на степень сжатия в зонах загрузки и пластикации оказывают плотность перерабатываемого материала, степень заполнения винтовых каналов червяка, действительное количество материала, затягиваемое в цилиндр в зоне загрузки (особенно это важно учитывать при переработке материалов с плохой сыпучестью и с малой насыпной массой) и количество расплавленного на данном участке червяка материала. Для двухчервячных экструдеров с зацепляющимися червяками правильный выбор направления вращения имеет большое значение для реализации поставленных задач переработки, выбор направления вращения червяков зависит от способности материала заполнять межвалковое пространство в зоне загрузки, скорости плавления полимера, от скорости сдвига, реализуемой в перерабатываемом материале (особенно в боковых и межвалковых зазорах), от наличия зон дегазации и т. д. В то время как двухчервячные экструдеры со встречным вращением червяков используются для экономически целесообразной переработки непластифицированного ПВХ и других полимеров в полуфабрикаты, двухчервячные экструдеры с однонаправленным вращением червяков применяются преимущественно для гомогенизации при компаундировании полимеров.

В табл. 4.3 приведены характеристики современных двухчервячных экструдеров, применяемых в подготовительных производствах промышленности пластмасс.

Двухчервячные экструдеры со встречным вращением незацепляющихся червяков работают при более высоких окружных скоростях червяков и могут применяться при переработке материалов с плохой сыпучестью, волокнистых и других материа-

Таблица 4.3. Характеристики двух червячных экструдеров, применяемых в подготовительном производстве

Тип червяков	Диаметр червяков, мм	Частота вращения червяков, мин ⁻¹	Окружная скорость червяков, м/с	Мощность привода, кВт
Зацепляющиеся со встречным вращением	60—170	120—100	0,4—0,9	25—260
Незацепляющиеся со встречным вращением	30—380	500—320	1,3—6,4	30—3000
Зацепляющиеся с однонаправленным вращением	50—300	500—125	1,3—2,0	30—2000

лов, т. е. тогда, когда требуется обеспечивать хорошую производительность запитки без возникновения больших распорных усилий на червяки, которые могут прижимать их к внутренним поверхностям цилиндра. Подобные машины, однако, имеют плохие напорные характеристики и в них трудно осуществлять процессы дегазации расплавов. Они непригодны для подготовительных процессов при производстве изделий из полимерных композиций и компаундов, где требуется интенсивный сдвиг перерабатываемого материала.

В случае необходимости дегазации предусматривают участки червяков с увеличенным объемом винтовых каналов, которые частично заполняются расплавом полимеров. При этом необходимо выбирать такие условия эксплуатации (высокая температура, образование свободной поверхности расплава, создание вакуума), которые обеспечивали бы высокую скорость диффузии удаляемых веществ и достаточное время пребывания частиц полимера в зоне вакуумирования. Один из способов снижения содержания остатков влаги в расплаве заключается во введении и последующем отсосе паров азота (с целью уменьшения парциального давления).

Шаг винтовой нарезки и другие геометрические параметры червяков следует выбирать с учетом реологических свойств перерабатываемого материала, сопротивления формующего инструмента, частоты вращения червяков и производительности.

Энергия диссипации зависит прежде всего от потоков утечек, следовательно, от зазора зацепления червяков, а также от ширины гребня и вязкости расплава.

Для определенных условий эксплуатации и типа червяков существуют оптимальные значения шага нарезки относительно длины заполнения винтового канала расплавом и энергии диссипации (рис. 4.46). (Данные получены на двухчервячном экст-

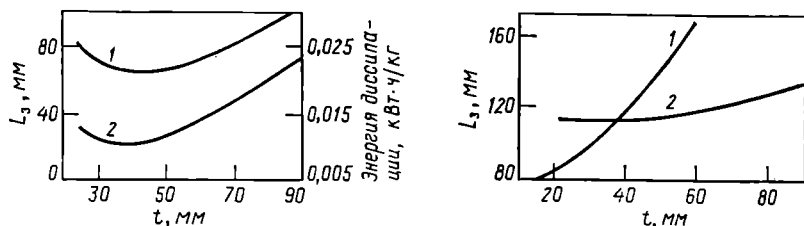


Рис. 4.46. Влияние шага нарезки винтового канала t на длину заполнения L_3 (1) и энергию диссипации (2) (однонаправленное вращение червяков диаметром 53 мм, перерабатываемый материал — полипропилен, температура расплава 530 К).

Рис. 4.47 Влияние геометрии червяков на длину заполнения L_3 (однонаправленное вращение червяков диаметром 53 мм, перерабатываемый материал — полиэтилен, температура расплава 490 К):

1 — однозаходная нарезка, плотное зацепление; 2 — трехзаходная нарезка, плотное зацепление.

Таблица 4.4. Технологические параметры переработки некоторых термопластов в двухчервячных экструдерах

Материал	Изделия, полуфабрикаты	Производительность, кг/ч	Экструдер	Формующий инструмент	Частота вращения червяка, об/мин	Температура в цилиндре и формующем инструменте*, К
ПЭВП, пластифицированный ПВХ	Гранулы линзообразные окрашенные	1000	Со встречным вращением червяков; $D=125$ мм; $L=20 D$	Круглый мундштук с 90 отверстиями диаметром 3 мм	175	423—453 473
Пластифицированный ПВХ	Гранулы цилиндрические	1100	С однонаправленным вращением червяков с блоками смесительных элементов; $D=125$ мм; $L=15 D$	Круглый мундштук с отверстиями диаметром 3 мм	45	423—433 433
Полиамид, наполненный 30% (масс.) мела	То же	300	То же; $D=90$ мм; $L=25 D$	Головка для производства нитей с отверстиями диаметром 5 мм	150	553—563 563
ПЭНП порошкообразный	»	800	Со встречным вращением червяков и с зоной дегазации; $D=125$ мм; $L=20 D$	Плоская фильера с отверстиями диаметром 2,5 мм	150	473—503
Непластифицированный ПВХ	Трубы водопроводные и для сточных вод	250	Со встречным вращением червяков и с зоной дегазации; $D=160$ мм; $L=20 D$	Трубная головка с вакуумной калибровкой	35	433—453 453

* В числителе — температуры в цилиндре, в знаменателе — в формующем инструменте.

рудере с $D=53$ мм с однонаправленным вращением червяков при переработке полипропилена с показателем течения 0,5 г/10 мин при производительности 120 кг/ч, полученной при частоте вращения $N=300$ об/мин, перепаде давления в головке 5 МПа, $T=533$ К.) Зависимость длины заполнения червяков расплавом от геометрии червяков показана на рис. 4.47. Результаты получены при переработке ПЭНП с показателем текучести 17—22 г/10 мин при $T=488$ К. Производительность экструдера составляла $G=25$ кг/ч, частота вращения червяков $N=170$ об/мин и $\Delta p=5$ МПа. В тесной связи с потоками утечек находится время пребывания перерабатываемого материала в двухчервячном экструдере. Необходимо выбирать такие геометрические соотношения червяков, чтобы был достигнут узкий спектр времен пребывания частиц полимера в экструдере.

В табл. 4.4 представлены технологические параметры процессов экструзии изделий и полуфабрикатов из некоторых типов термопластов в двухчервячном экструдере.

4.3. ФОРМУЮЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ ЭКСТРУДЕРОВ (ЭКСТРУЗИОННЫЕ ГОЛОВКИ)

В формующих инструментах осуществляется формирование поступающего из экструдера гомогенного расплава: ему придается форма соответствующего готового изделия, причем в некоторых случаях окончательное формование и фиксация формы производится в калибрующих устройствах.

Основные требования к формующему инструменту: обеспечение равномерности подачи расплава полимера к оформляющим каналам (к выходу); исключение нарушения стабильности процесса; равенство скоростей потока по ширине и периметру выходной щели; исключение колебаний температуры, перегрева перерабатываемого материала и т. д.

Для конструирования формующего инструмента необходимо знать реологические свойства перерабатываемого материала.

В зависимости от фор-

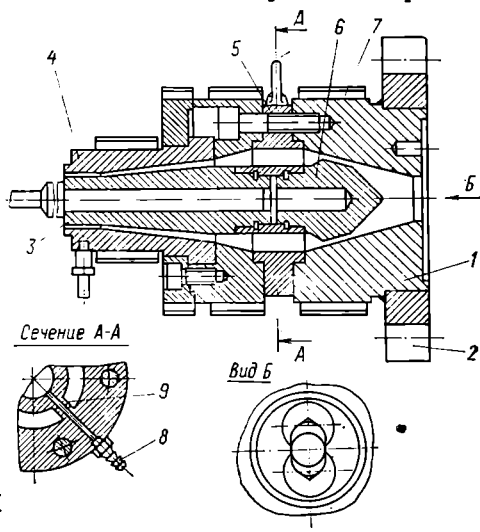


Рис. 4.48. Прямоточная трубчатая головка:

1 — корпус головки; 2 — фланец; 3 — дорн; 4 — муфта; 5 — дорнодержатель; 6 — наконечник дорна; 7 — нагревательный элемент; 8 — штуцер для сжатого воздуха; 9 — ребро дорнодержателя.

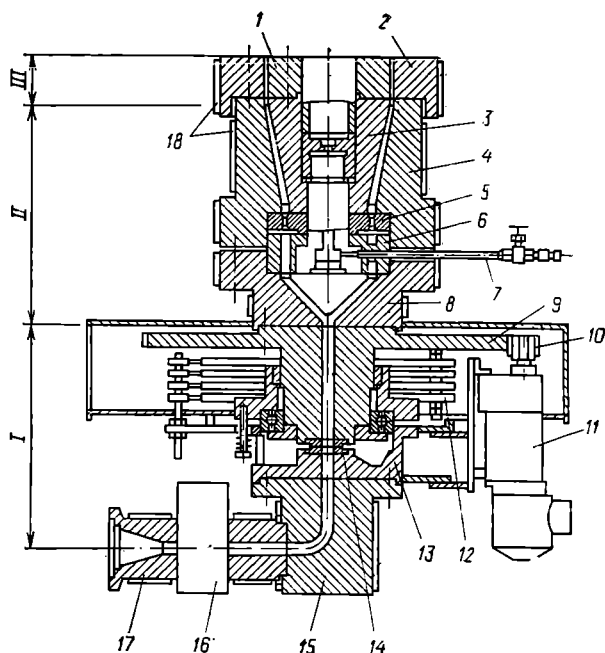


Рис. 4.49. Угловая экструзионная головка для получения рукавной пленки:

1 — кольцо дорна; 2 — мундштук; 3 — дорн; 4 — обойма мундштука; 5 — решетка; 6 — дорнодержатель; 7 — штуцер для подвода сжатого воздуха; 8 — переходник; 9 — вращающийся диск; 10 — зубчатая передача; 11 — привод; 12 — скользящее кольцо; 13 — вращающаяся втулка; 14 — уплотнительные шайбы; 15 — поворотная деталь; 16 — фильтр; 17 — переходник; 18 — электронагреватели; I, II, III — входная, переходная и формующая зоны соответственно.

мы экструдата различают: формующий инструмент с замкнутым формующим контуром поперечного сечения канала (для получения полых профилей, труб, раздувных пленок, покрытий проводов и кабелей) и с открытым контуром поперечного сечения канала (для получения сплошных профилей, листов, плоских пленок).

Формующий инструмент первого типа характеризуется наличием специальных элементов (дорнов), которые обтекаются (омываются) расплавом полимера с разделением потоков и их последующим соединением. Это обстоятельство создает определенные технические трудности при конструировании формующего инструмента. По способу крепления дорна различают формующий инструмент с неподвижным креплением дорна в специальных дорнодержателях и с креплением дорна без дорнодержателя.

В формующем инструменте первого типа дорн посредством звездообразного дорнодержателя с радиально расположенными ребрами крепится к корпусу формующего инструмента, а ребра дорнодержателя рассекают расплав полимера. Такие головки

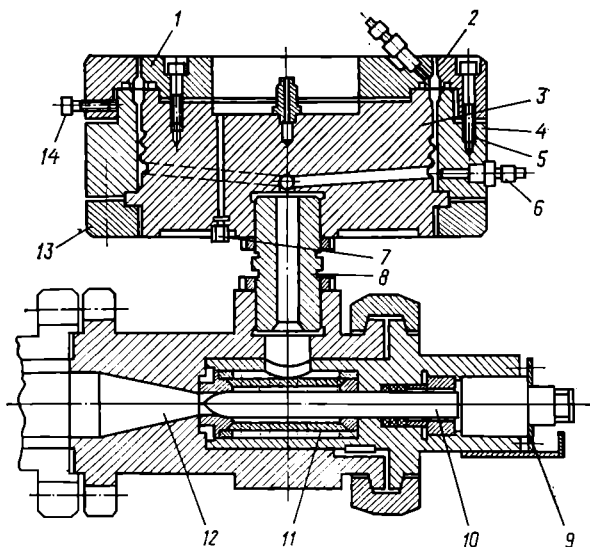


Рис. 4.50. Экструзионная головка для получения рукавной пленки с центральным питанием и регулируемым давлением:

1 — формирующее кольцо; 2 — мундштук; 3 — дорн; 4 — корпус мундштука; 5 — крепежные болты; 6 — терморы; 7 — штуцер для подвода сжатого воздуха; 8 — переходная втулка; 9 — крепежная шайба; 10 — дроссель; 11 — фильтр; 12 — переходник; 13 — крепежная втулка; 14 — болт регулировки кольцевого зазора.

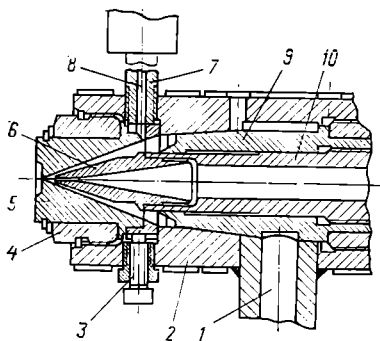
применяются при производстве труб (рис. 4.48), полых профилей и рукавных пленок (рис. 4.49).

Существуют головки с дорном, который крепится не при помощи дорнодержателя, а с помощью фланцев, расположенных на дорне (рис. 4.50). Такие головки применяются в производстве рукавных пленок.

На рис. 4.51 и 4.52 представлены головки для нанесения покрытий на кабели или провода и для производства рукавных пленок. В таких головках дорн крепится к специальному полному стержню, имеющему возможность осевого перемещения. В этих головках происходит боковое питание расплавом, а между дорном и корпусом головки имеется распределительный канал, предназначенный для обеспечения равномерного подвода расплава полимера к оформляющей щели. При этом возникает проблема выравнивания линейных скоростей потока по периметру оформляющей щели.

Независимо от назначения головок (головки для экструзии гранул, труб, профилей, листов, плоских и рукавных пленок) в них имеются следующие зоны: 1) входная зона (переход от экструдера к головке), в которой происходит изменение конфигурации поперечного сечения подводящих каналов — круглая (в случае одночервячных экструдеров) форма и форма восьмерки

Рис. 4.51. Кабельная головка:



1 — переходник; 2 — корпус головки; 3 — регулировочный болт; 4 — гайка; 5 — муфта; 6 — дорн; 7 — сопло для подвода окрашенного расплава; 8 — подводящий канал; 9 — регулирующая втулка; 10 — гильза.

(для двухчервячных экструдеров) преобразуется в большинстве случаев в прямоугольный или овальный каналы непосредственно на входе в головку; 2) переходная зона или участок распределения расплава, в которой прямоугольная или овальная

формы поперечного сечения потока расплава трансформируются в форму поперечного сечения соответствующего полуфабриката непосредственно на входе в оформляющий канал; 3) оформляющая (формующая) зона, в которой из полимера формируется изделие или полуфабрикат требуемого профиля.

В работах [4.116] и [4.173] приведены теоретические основы расчета и практические рекомендации для конструирования формующего инструмента экструдеров.

Проектирование и расчет экструзионных головок производят в следующей последовательности:

1) определение размеров оформляющих зазоров; при этом необходимо учитывать степень вытяжки и разбухания экструдата;

2) расчленение каналов сложной геометрии на участки простой геометрии поперечного сечения и определение соответствующих элементарных расходов через эти участки;

3) определение скоростей сдвига $\dot{\gamma}$ для данной температуры переработки и эффективной вязкости по кривым течения;

4) расчет коэффициентов сопротивления K_i для каждого из элементарных участков сечения оформляющих каналов; при этом используется известное соотношение между объемной производительностью и перепадом давления для данной геометрии оформляющих каналов. Коэффициент K_i зависит от геометрических размеров и формы каналов;

5) расчет перепада давления;

6) сравнение перепада давления отдельных участков. В случае большого различия в перепадах давления задают новые размеры сечений участков и расчет повторяют;

7) оценка повышения температуры $\Delta\theta$ вследствие диссипативного тепловыделения при сдвиговом течении в адиабатическом приближении:

$$\Delta\theta = \frac{\eta \dot{\gamma}^2 l}{c_p} \quad (4.132)$$

Для расчета общего перепада давления применяются следующие формулы:

при последовательном соединении участков каналов

$$\Delta p = \sum_{i=1}^k \Delta p_i \quad (4.133)$$

при параллельном соединении

$$\Delta p = \Delta p_i = \Delta p_1 = \Delta p_2 = \dots = \Delta p_k \quad (4.134)$$

где k — число участков; Δp — суммарный перепад давления; Δp_i — перепад давления на отдельных участках.

При конструировании экструзионных головок необходимо обеспечивать выполнение следующих основных требований:

- 1) реологически благоприятные условия течения расплава полимера по каналу за счет плавного изменения поперечного сечения (угол наклона при коническом переходе должен быть $\leq 30^\circ$);
- 2) постоянство размеров оформляющих каналов с целью исключения локальных деформаций расплава на определенных участках головки, приводящих к искажению размеров экструдата;
- 3) точная воспроизводимость фиксации положения отдельных деталей головки;
- 4) возможность доработки отдельных деталей с целью корригирования потоков расплава;
- 5) легкий монтаж, демонтаж, обслуживание и ремонт головки;
- 6) экономия материала при изготовлении экструзионных головок.

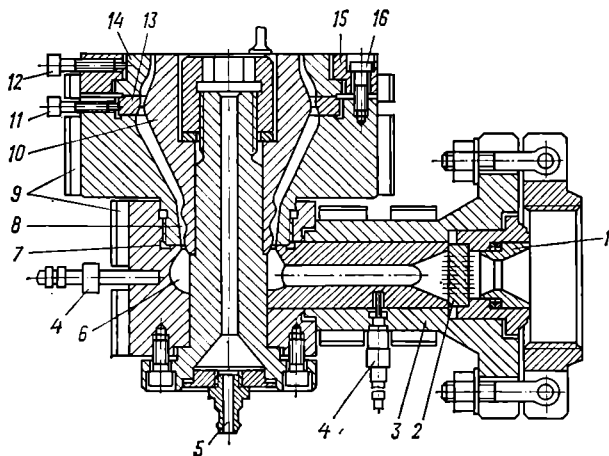


Рис. 4.52. Экструзионная головка для получения рукавных пленок с боковым питанием расплавом:

1 — переходник; 2 — фильтр; 3 — корпус головки; 4 — термодатчики; 5 — штуцер для подвода сжатого воздуха; 6 — коллекторный канал; 7 — затвор (сужение); 8 — выравнивающий канал; 9 — электронагреватели; 10 — дорн; 11 — болт для регулирования степени дросселирования; 12 — болт для регулирования величины формующего зазора; 13 — дросселирующее кольцо; 14 — мундштук; 15 — крепежная втулка; 16 — крепежный болт.

Экструзионные головки различаются по способу крепления к цилиндру экструдера (с помощью фланцев, байонетных затворов и откидных болтов), по расположению оси головки относительно оси червяка (угловые, прямоточные и офсетные) и по типу нагревателей (с нагревателями сопротивления и нагревом жидкими теплоносителями).

4.4. ЭКСТРУЗИОННЫЕ ЛИНИИ

4.4.1. Агрегаты для гранулирования

При проведении процессов подготовительного производства — окраски, введения наполнителей (мел, каолин, тальк и т. д.), мягчителей, стабилизаторов, совмещения полимеров друг с другом, удаления летучих из полимеров и других — на экструзионных агрегатах получают гранулы. Экструзионные агрегаты для гранулирования состоят из экструдера и собственно гранулирующего устройства, которое включает формующий инструмент, гранулятор, устройство для охлаждения гранул.

В промышленности пластмасс используют различные способы гранулирования.

Гранулирование непосредственно на фильере. Резка расплава полимера осуществляется на мундштуке. Прочность гранул обеспечивается охлаждением их в области резки — воздухом, распылением воды, омытием водой. Последующее окончательное охлаждение гранул осуществляется также водой или воздухом.

Сухое гранулирование на фильере. Резка расплава непосредственно на фильере осуществляется с помощью вращающихся ножей, установленных соосно с головкой или эксцентрично к ней. При соосном расположении режущих ножей отверстия на решетке расположены по концентрическим окружностям (рис. 4.53, а), а при эксцентрическом расположе-

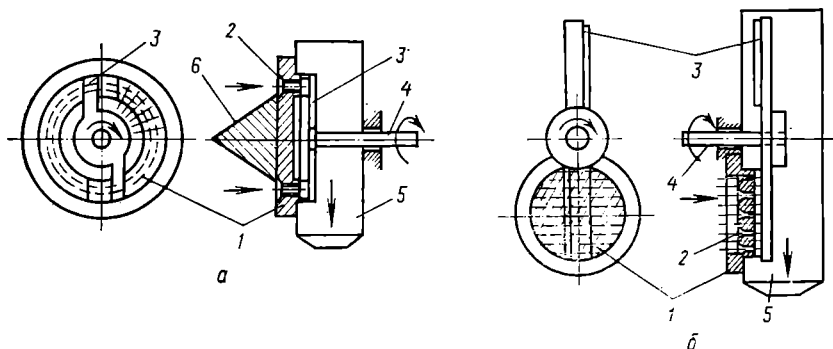


Рис. 4.53. Гранулятор горячей резки:

а — соосное с головкой расположение режущих ножей; б — эксцентрическое расположение режущих ножей; 1 — перфорированная плита; 2 — формующее отверстие; 3 — режущий нож; 4 — вал привода режущих ножей; 5 — кожух; 6 — торпеда.

нии отверстия распределены равномерно по всей плоскости плиты (рис. 4.53, б). При гранулировании используется воздушное охлаждение. Этот способ гранулирования применяется при переработке материалов с относительно низкой энтальпией при соответствующей температуре экструзии при повышенной прочности расплава и незначительной прилипаемости его к металлам (непластифицированный и пластифицированный ПВХ, высоконаполненные полиолефины).

Горячее гранулирование в увлажненной среде. Резка расплава непосредственно на плоскости фильеры производится вращающимися ножами, расположенными соосно или эксцентрично, а упрочнение срезов достигается водяной пылью (туманом). Окончательное охлаждение гранул осуществляется холодным воздухом. Способ применяется для полимеров со склонностью прилипать к металлическим поверхностям и высокой энтальпией, но относительно малой прочностью расплава, упрочнение которого требует интенсивного предварительного охлаждения (полиолефины, полистирол и др.).

Мокрое гранулирование с горячей резкой. Резка происходит так же, как в предыдущем случае, но упрочнение среза осуществляется воздухом, а окончательное охлаждение — водой, подаваемой различными устройствами. Способ применяется для расплавов полимеров с высокой энтальпией и относительно высокой прочностью расплава, но склонных прилипать к металлическим поверхностям — полиолефинов, АБС-пластика, поликарбоната и др.

Полумокрый способ гранулирования с горячей резкой расплава. Горячая резка в водяном тумане сопровождается охлаждением водой. Как и предыдущий способ, применяется для материалов с высокой энтальпией, относительно высокой прочностью расплава, но склонных прилипать к металлическим поверхностям.

Подводное гранулирование. Резка производится соосно расположенными ножами, упрочнение среза и охлаждение гранул осуществляется водой. Этот способ применяется при переработке материалов с высокой энтальпией и ма-

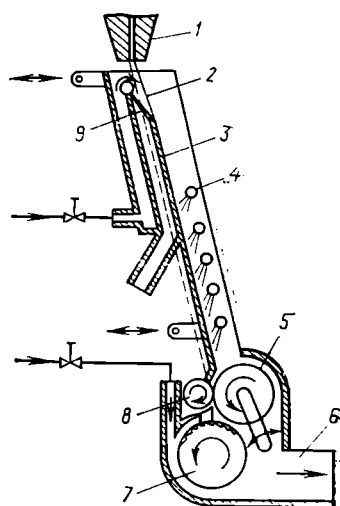


Рис. 4.54. Схема гранулирования в водяном тумане:

1 — формующий инструмент экструдера (для получения прутков); 2 — пруток; 3 — охлаждаемая водой наклонная плоскость; 4 — форсунка для холодной воды; 5 — прижимной валок; 6 — водяная баня; 7 — режущее устройство; 8 — приводной валок; 9 — наклонная регулирующая плоскость.

лой прочностью расплава, а также при крупнотоннажном производстве гранул, когда экструдеры развивают высокую производительность (1000 кг/ч и более). Из-за непосредственного контакта холодной воды с решеткой возникает опасность переохлаждения последней. Во избежание этого применяется дополнительный подвод тепла, а также теплоизоляция решетки.

Холодное гранулирование. Выдавливается заготовка в виде круглых прутков или лент, которые предварительно охлаждаются воздухом или водой, а затем режутся специальным режущим устройством (рис. 4.54).

В зависимости от типа экструдера и способа гранулирования производительность агрегатов для гранулирования составляет от 100 до 4000 кг/ч.

4.4.2. Экструзионные линии для производства профилей и труб

Производство труб и профилей состоит из следующих стадий: выдавливание заготовки, калибровка, охлаждение, отбор (вытягивание), резка и штабелирование (при производстве гибких труб — шлангов — изделие наматывается на приемный барабан).

На рис. 4.55 и 4.56 представлены принципиальные схемы производства труб из полимеров методом экструзии.

Для производства труб применяют непластифицированный ПВХ (трубы диаметром до 800 мм), ПЭНП (трубы диаметром до 1600 мм), ПЭВП, ударопрочный полистирол, полипропилен и другие полимеры. Конструкция формирующих инструментов зависит от свойств перерабатываемого материала (термостойкости, реологических свойств) и от размера получаемых труб.

При производстве труб из непластифицированного ПВХ применяются прямоточные головки с радиальным расположением дорнодержателя. При экструзии труб из полиолефинов

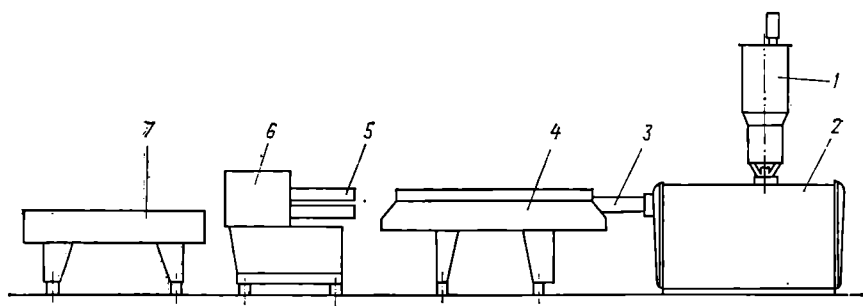


Рис. 4.55. Принципиальная схема экструзионного агрегата для производства труб из ПВХ:

1 — обогреваемый бункер; 2 — одночервячный экструдер; 3 — формирующий инструмент; 4 — охлаждающее и калибрующее устройства; 5 — тянущее устройство; 6 — отрезное устройство; 7 — штабелеукладчик.

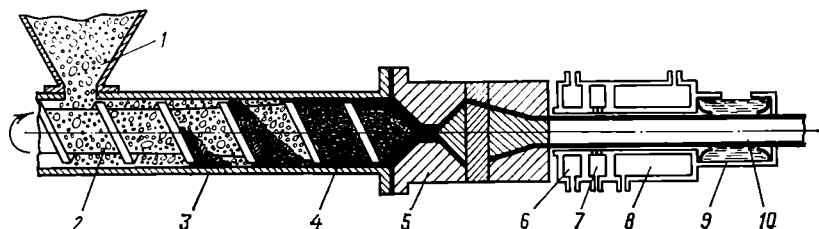


Рис. 4.56. Принципиальная схема потока материала в экструзионном трубном агрегате:

1 — загрузочный бункер; 2 — червяк; 3 — цилиндр; 4 — расплав полимера; 5 — формующий инструмент; 6 — зона охлаждения; 7 — зона вакуумирования; 8 — охлаждающая камера; 9 — водяная баня; 10 — готовая труба.

применяются головки, обеспечивающие высокую термическую нагрузку и равномерное распределение потоков расплава по периметру оформляющего кольцевого зазора. При изготовлении труб большого диаметра после формования заготовки требуется произвести фиксацию формы и размеров в калибрующем устройстве, не требующуюся только при производстве шлангов. Методы калибровки различаются по расположению калибруемых поверхностей и способу создания усилий (рис. 4.57, 4.58, 4.59).

При внешней калибровке избыточным давлением воздух гоняется через отверстие в дорнодержателе и в дорне. Давление воздуха составляет 0,05—0,2 МПа. Калибрующее устройство крепится непосредственно к головке через термоизоляцию, а калибрующая гильза охлаждается водой. Длина гильзы в калибрующих устройствах равна $(3 \div 4)D_T$ (где D_T — внешний диаметр трубы) при производстве труб из непластифицированного ПВХ и $(4 \div 6)D_T$ при производстве труб из полиолефинов. Внешний диаметр труб из непластифицированного ПВХ равен диаметру мундштука, а внешний диаметр труб из полиолефинов на 2—3% больше диаметра мундштука.

При внешней калибровке вакуумом (применяется при производстве труб из непластифицированного ПВХ диаметром до 350 мм и труб из полиолефинов диаметром до 110 мм) калиб-

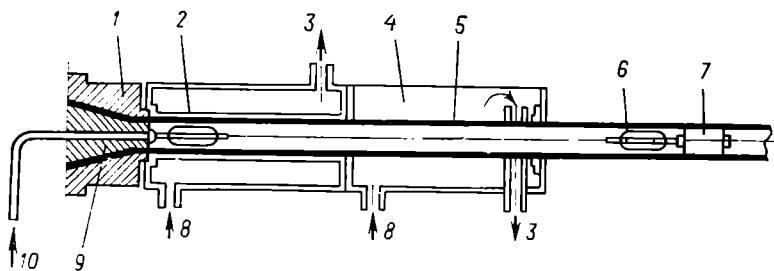


Рис. 4.57 Внешняя калибровка труб избыточным давлением:

1 — мундштук; 2 — калибрующая гильза; 3 — отвод охлаждающей воды; 4 — ванна охлаждения; 5 — труба; 6 — цепь; 7 — пробка; 8 — подвод охлаждающей воды; 9 — дорн; 10 — подвод сжатого воздуха.

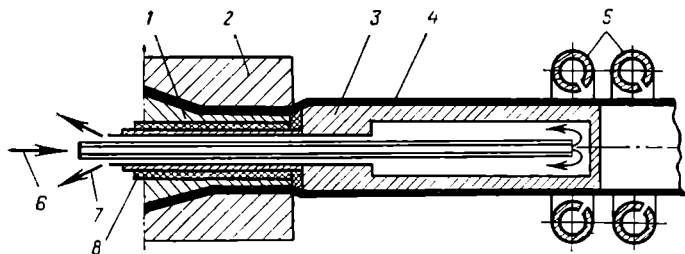


Рис. 4.58. Внутренняя калибровка труб:

1 — дорн; 2 — мундштук; 3 — калибрующий дорн; 4 — труба; 5 — орошающие кольца; 6 — подвод охлаждающей воды; 7 — отвод охлаждающей воды; 8 — теплоизоляционная втулка.

рующее устройство располагается на расстоянии 10—100 мм от формующего инструмента. Входная зона калибрующего устройства интенсивно охлаждается. За зоной охлаждения следует участок калибровки, за которым снова следует зона охлаждения. Калибровка осуществляется при давлении 0,06—0,08 МПа. При производстве труб из непластифицированного ПВХ длина калибрующей гильзы составляет $(4 \div 6)D_T$, из полиолефинов — $(5 \div 7)D_T$. Внутренний диаметр калибрующей гильзы на 12—20% меньше диаметра мундштука.

Внутренняя калибровка применяется при производстве тонкостенных труб из полиолефинов диаметром до 150 мм. При этом применяется холодный калибрующий дорн, прикрепленный непосредственно к формующему инструменту. Теплоноситель (хладагент) через теплоизолированную трубу, смонтированную в головке, подводится к калибрующему дорну. Применяются чаще всего угловые и офсетные головки. Длина калибрующего дорна составляет $(2 \div 4)D_T$. Комплектующие устрой-

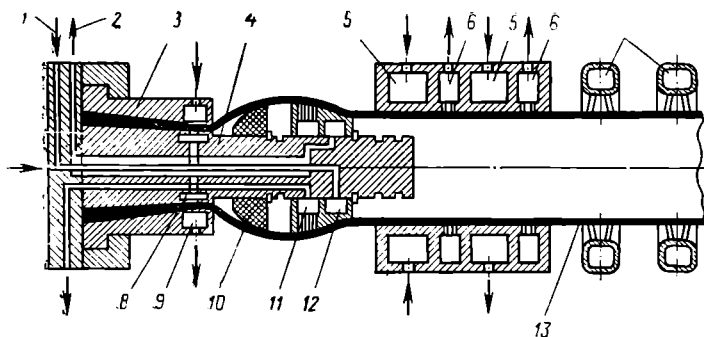


Рис. 4.59. Комбинированная внутренняя и внешняя калибровка труб из вспененного ПВХ:

1 — подвод охлаждающей воды; 2 — отвод охлаждающей воды; 3 — мундштук; 4 — дорн с удлинителем для внутренней калибровки трубы; 5, 12 — камеры для охлаждающей жидкости; 6 — вакуумные камеры; 7 — орошающие кольца; 8 — термостатируемая камера в дорне; 9 — термостатируемая камера в мундштуке; 10 — кольца из фторопласта-4; 11 — вакуумная камера; 13 — труба.

ва, расположенные за формующим инструментом и калибрующим приспособлением, — охлаждающие, тянущие, режущие и приемные устройства — независимо от типа труб работают по одному и тому же принципу во всех трубных агрегатах.

В агрегатах для производства шлангов и гибких труб из полиэтилена диаметром до 32 мм применяется приемное устройство барабанного типа.

Производство профилей принципиально не отличается от производства труб. Различие состоит в степени трудности конструирования и изготовления формующего инструмента.

В формующих инструментах должны быть предусмотрены участки, позволяющие проводить наладочные работы при сложной конфигурации поперечного сечения получаемых профилей (осесимметричные профили, профили с различной толщиной стенок, перегородок). При наладочных испытаниях формующих инструментов необходимо прежде всего корректировать переходную зону, а затем проводить точную корректировку в зоне формующих зазоров.

4.4.3. Экструзионные линии для производства листов и плоских пленок

Технологический процесс производства листов (из непластифицированного ПВХ, ударопрочного ПС, АБС-пластика, ПП, ПЭВП и ПЭНП толщиной 0,25—20 мм и шириной 2000—3500 мм) и плоских пленок (толщиной 0,015—0,2 мм и шириной до 5000 мм) состоит из следующих стадий: выдавливание заготовок, калибровка, охлаждение, обрезка продольных кромок, отбор, поперечная резка, стапелирование или намотка.

Из-за различной вязкости перерабатываемого материала при производстве листов и плоских пленок применяются различные конструкции формующего инструмента, калибрующего устройства (горизонтального и вертикального типа), охлаждающего, тянущего и приемного устройств.

При производстве листов (рис. 4.60) используются плоскощелевые экструзионные головки с упругой дроссельной план-

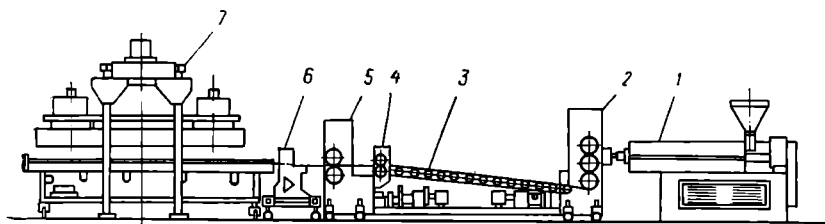


Рис. 4.60. Принципиальная схема линии для производства листов:

1 — экструдер; 2 — калибрующий и гладильный каландр; 3 — рольганг для охлаждения листа; 4 — устройство для продольной резки боковых кромок; 5 — тянущее устройство; 6 — устройство для поперечной резки листов; 7 — штабелеукладчик.

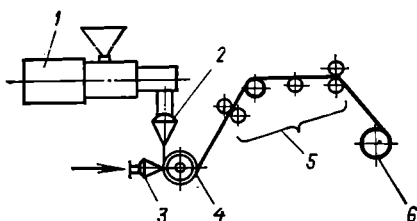


Рис. 4.61. Принципиальная схема линии для получения плоских пленок:

1 — экструдер; 2 — формующий инструмент; 3 — сопло для подачи охлаждающего воздуха; 4 — охлаждающий барабан (валок); 5 — тянущие и охлаждающие валки; 6 — приемное устройство.

кой для выравнивания скоростей потока по ширине оформляющей щели. Толщина листа регулируется вертикальным перемещением верхней губки. Калибровка и предварительное охлаждение листа осуществляется валками гладильного каландра, охлаждаемыми водой или маслом. Окончательное охлаждение осуществляется воздухом на рольгангах, а продольные кромки обрезаются специальными дисковыми ножами.

Тянущее устройство представляет собой двухвалковую машину с гуммированными валками с бесступенчатым регулированием скорости отвода (0—2 м/мин). Максимальная скорость отбора зависит от типа перерабатываемого материала и толщины листа. Так, для листов ПЭНП толщиной $\delta < 1$ мм максимальная скорость отбора $v_{\max} \leq 2$ м/мин, при $\delta = 3$ мм $v_{\max} = 0,6$ м/мин, а при $\delta = 6$ мм $v_{\max} = 0,12$ м/мин. Для поперечной резки листовой заготовки применяются гильотинные ножи (при толщине листа $\delta = 6$ мм) или дисковые ножи, перемещающиеся как в поперечном, так и в продольном направлениях.

При производстве плоских пленок (рис. 4.61) применяются головки с вертикальной или горизонтальной выдачей заготовки. Выравнивание линейных скоростей потока по ширине головки осуществляется с помощью круглых коллекторных каналов и в результате упругой деформации губки (рис. 4.62). Охлаждение пленки осуществляется холодной водой или воздухом при вертикальной выдаче заготовки или с помощью охлаждающих валков при горизонтальной выдаче заготовки. Во избежание продольных складок устройство для резки продольных кромок, тянущие и гладильные валки спарены, т. е. работают от одного привода. Линейная скорость отбора пленки достигает 150 м/мин. Готовая пленка наматывается на приемный барабан с постоянной наружной скоростью отбора. Оптические и механические свойства плоских пленок в большой степени зависят от

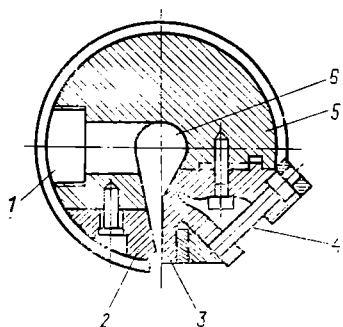


Рис. 4.62. Экструзионная головка для получения плоских пленок:

1 — подводный канал; 2, 3 — оформляющие губки; 4 — регулировочный болт; 5 — корпус головки; 6 — коллектор.

технологических параметров процесса их производства. Так, полипропиленовые пленки с интенсивным охлаждением на валках обладают большой прозрачностью. При температуре охлаждения 350—360 К пленки получаются мутными, с незначительной ударной вязкостью.

Основными параметрами процесса производства плоских пленок являются линейная скорость выхода заготовки из головки, расстояние между выходными кромками губок и охлаждающими валками (для полиолефинов это расстояние равно 20—70 мм), температура выходящего из головки расплава, температура поверхности охлаждающих валков, ширина оформляющего зазора.

4.4.4. Экструзионные агрегаты для производства рукавных пленок

При высокопроизводительном изготовлении рукавных пленок из ПЭНП, ПЭВП, непластифицированного ПВХ, к которым не предъявляют высокие требования в отношении оптических свойств, получают пленки толщиной 0,01—0,025 мм и шириной до 12 м при скорости отбора до 120 м/мин. При производстве рукавных пленок выходящая из кольцевой щели рукавная заготовка вытягивается, раздувается, охлаждается, через клиновидный зазор, образованный ограниченными пластинами, подается к тянущему устройству и наматывается на приемный барабан.

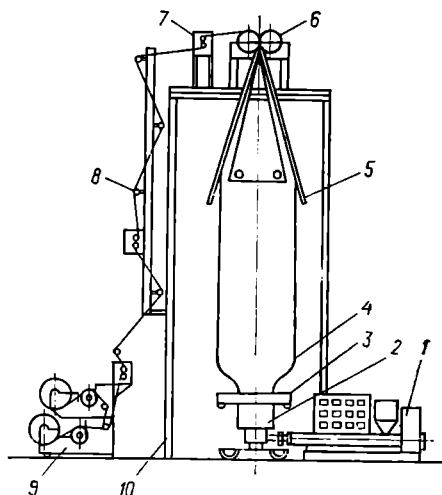
В зависимости от направления выдавливания различают следующие три способа производства рукавных пленок:

— способ производства «вертикально вверх», который применяется для изготовления пленок больших размеров, а также при переработке материалов с высоким показателем текучести; при этом способе массу рукавной заготовки воспринимают участки охлажденного, следовательно, упрочненного материала (рис. 4.63);

— способ производства «вертикально вниз», применяемый для маленьких типоразмеров экструдеров,

Рис. 4.63. Принципиальная схема линии для производства рукавной пленки:

1 — экструдер; 2 — формующий инструмент; 3 — охлаждающее кольцо; 4 — рукав и пленки; 5 — ограничительные щетки; 6 — тянущие валки; 7 — приспособление для предварительной обработки; 8 — направляющие ролики; 9 — приемное устройство (двойное намоточное устройство); 10 — станция.



так как при больших размерах машин требуются значительные расходы на монтаж экструдера в верхних этажах здания или на специальных эстакадах; этот способ применяется преимущественно при производстве пленок небольших размеров;

— горизонтальный способ получения рукавных пленок применяется в особых случаях, например при получении пленок из непластифицированного ПВХ, вспененных полистирола и полиэтилена; из-за разности температур верхней и нижней сторон пленки и действия гравитационных сил трудно обеспечивать точность размеров пленки.

Стабильность процессов производства пленок зависит от следующих параметров: скорости экструзии, температуры расплава, интенсивности охлаждения, скорости отвода пленки, диаметра рукава и перерабатываемого материала. Форма рукава (пузыря пленки), ее стабильность и скорость движения находятся в тесной взаимосвязи с указанными параметрами.

Форма пузыря пленки прежде всего зависит от положения линии «замерзания» (линии застывания вязкопластичного материала), которое в свою очередь определяется стабильностью процесса охлаждения. Для каждого типа перерабатываемого материала имеется своя оптимальная высота линии «замерзания». В большинстве случаев пузырь пленки под линией заморозки имеет коническую форму. Во избежание образования складок по периметру рукава необходимо обеспечивать равномерное охлаждение и постепенное складывание рукава путем установки соответствующего угла раскрытия направляющих щек. Наконец, для получения качественных пленок необходимо поддерживать постоянные скорости отвода и намотки при постоянстве натяжения пленки.

4.4.5. Экструзионные линии для нанесения полимерных покрытий

Для нанесения покрытий из термопластичных полимерных материалов на электрические провода, кабели, стальные трубы, на деревянные планки и другие полуфабрикаты применяются экструзионные линии на базе одночервячных пластицирующих экструдеров, причем широкое использование получили экструзионные агрегаты в кабельной промышленности. Например, для

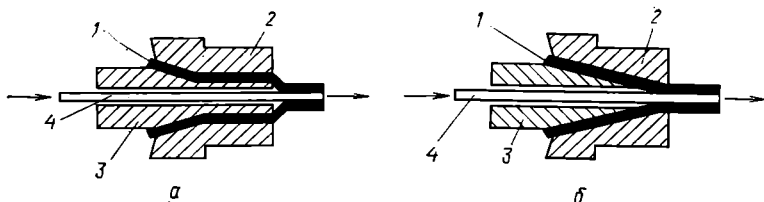


Рис. 4.64. Способы нанесения рукавных покрытий (а) и изоляции (б) под давлением:

1 — расплав полимера; 2 — мундштук; 3 — дорн; 4 — проводник.

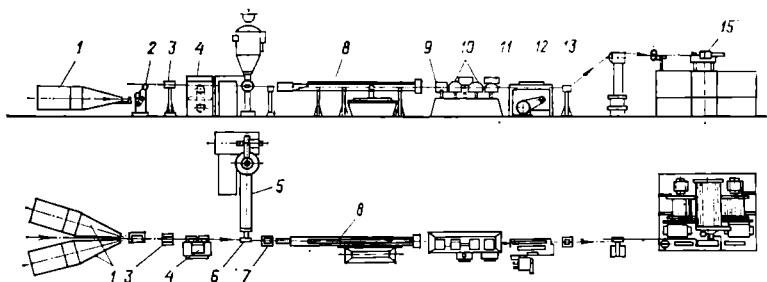


Рис. 4.65. Экструзионный агрегат для нанесения кабельных покрытий:

1 — двухручьевая экструзионная головка; 2 — тормозное устройство для привода; 3 — направляющие ролики; 4 — устройство для предварительного подогрева кабеля (провода); 5 — экструдер; 6 — кабельная головка; 7 — приспособление для маркировки; 8 — охлаждающее устройство (водяная ванна); 9 — прибор для замера и регулирования диаметра покрытий; 10 — прибор для испытаний покрытий под высоким напряжением; 11 — счетчик длины кабеля; 12 — тянущее устройство; 13 — поворотный ролик; 14 — натяжное устройство для поддержания постоянства натяжения кабеля; 15 — приемное устройство.

техники связи медные провода диаметром 0,4—1,4 мм покрываются полиэтиленовой или поливинилхлоридной пленкой толщиной 0,15—0,25 мм; для низкочастотной техники применяются покрытия из ПВХ; для кабелей диаметром 20—120 мм применяются покрытия из ПЭВП толщиной 4—25 мм.

В экструзионных процессах нанесения покрытий предварительно обработанный провод сквозь специальную подводящую гильзу (втулку) непрерывно протягивается через формующий инструмент. В формующем инструменте он покрывается расплавом полимера, поступающим из экструдера, охлаждается, непрерывно вытягивается и наматывается.

Существует два способа нанесения покрытий: рукавный и под давлением. При первом способе покрытие наносится вне формующего инструмента (рис. 4.64, а), а при втором — внутри формующего инструмента (рис. 4.64, б). Соответственно применяются и различные конструкции формующего инструмента. На рис. 4.65 показана принципиальная схема экструзионного агрегата для нанесения изоляции на одно- и многожильные провода. Он состоит из сдвоенной сматывающей головки, тормозного устройства, направляющих роликов, устройства для предварительного нагрева провода, одночервячного экструдера, прибора для тиснения, устройства для охлаждения, прибора для замера диаметра, прибора для испытания изоляции высокого напряжения, счетчика длины изолированного провода, тянущего устройства, поворотных роликов и приемника.

4.5. ПОЛУЧЕНИЕ ОБЪЕМНЫХ ИЗДЕЛИЙ ЭКСТРУЗИЕЙ С РАЗДУВАНИЕМ

4.5.1. Общая характеристика процесса

Одним из наиболее распространенных видов оборудования для переработки полимерных материалов являются экструзион-

ные агрегаты, с помощью которых получают пленку, листы, объемные изделия, различные профили и т. д.

Во всех этих агрегатах производство изделий осуществляется в основном в три стадии: первая стадия — предварительная обработка (пластикация и гомогенизация полимерного материала, осуществляемая в экструдере), вторая стадия — формование (придание изделию предварительной или окончательной формы, осуществляемое в формующем инструменте) и третья стадия — окончательная обработка (фиксация размеров изделия в комплектующем оборудовании различных типов).

Вопросы, связанные с предварительной подготовкой материала, рассматриваются в различной литературе, поэтому в данной книге целесообразно более подробно остановиться на процессах, происходящих в формующем инструменте и комплектующем оборудовании.

В связи с тем, что в последнее время широкое распространение получило формование объемных изделий из термопластов методом раздува сжатым воздухом, в качестве примера экструзионного агрегата рассмотрим оборудование для получения объемных изделий экструзией с раздуванием.

Качество изделий, получаемых методом экструзионно-раздувного формования, зависит от свойств исходного материала, конструкции формующего инструмента, условий изготовления и формования заготовки.

Из свойств исходного материала на процесс раздувного формования наибольшее влияние оказывают плотность и показатель текучести расплава полимера. Увеличение плотности делает изделие более жестким и придает ему повышенную химическую и термическую стойкость. Одновременно понижается ударная вязкость и повышается газопроницаемость. С увеличением показателя текучести расплава улучшается гляцевитость изделия и понижаются ударная вязкость, относительное удлинение и сопротивление растрескиванию.

Оба эти показателя, а также режим охлаждения определяют внешний вид объемного изделия — гляцевитость и прозрачность. Чем выше степень кристалличности полимера, тем в большей степени прозрачность зависит от режима охлаждения. Состояние поверхности изделия, формируемого из заготовки с относительной низкой температурой, определяется почти исключительно состоянием поверхности заготовки, даже при шероховатой поверхности формы. Однако для большинства термопластов получение изделий с блестящей поверхностью при низкой температуре заготовок весьма затруднительно. Наоборот, при высокой температуре заготовок гляцевитость поверхности изделия определяется состоянием поверхности пресс-формы. В изделиях с гляцевитой поверхностью меньше зародышевых микротрещин. Интенсивность развития этих трещин определяется структурой полимера: кристаллизация и рост сферолитов в изделии способствуют развитию трещин. Чем больше число центров

кристаллизации, т. е. чем выше скорость охлаждения изделия, тем ниже общая степень кристалличности и меньше возможность образования крупных сферолитов. Процесс кристаллизации, хотя и медленно, продолжается при комнатной температуре, поэтому через несколько дней прочность изделий становится значительно ниже.

Увеличение степени раздувания, способствующее повышению разнотолщинности стенок, вызывает помимо повышенной усадки по диаметру увеличение степени ориентации материала в местах резкого изменения сечения изделий, что снижает как ударную вязкость, так и устойчивость к растрескиванию.

Усадка объемных изделий является важным эксплуатационным фактором. Она зависит не только от коэффициента термического расширения перерабатываемого материала, но и от структуры материала, внутренних напряжений, формы изделия и способности материала течь в холодном состоянии.

Главной причиной усадки изделий является восстановление упругих деформаций. Если заготовка не подвергалась предварительной вытяжке, наибольшая усадка изделий наблюдается по диаметру. В изделиях сложной конфигурации трудно заранее предугадать характер усадки. Проблема неравномерной усадки может быть решена путем отжига изделий при температурах выше точки размягчения непосредственно в формах, однако это связано с удлинением цикла, снижением температуры формы и повышением скорости охлаждения изделия.

И, наконец, на качество объемных изделий влияют условия изготовления и формования заготовки.

4.5.2. Методы производства объемных изделий раздуванием

Многие объемные изделия из термопластов (бочки, фляги, канистры и т. д.) можно изготовить только методом раздувного формования.

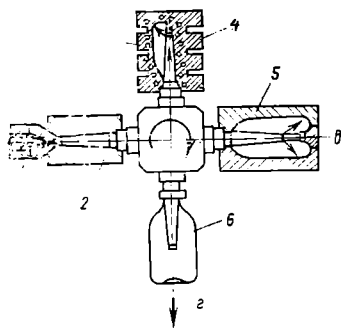
Преимущества этого метода: сравнительно простая технология производства, высокая производительность оборудования, возможность автоматизации производства, невысокая стоимость оснастки и др.

Объемные изделия из термопластов изготавливаются тремя способами: а) склеиванием или свариванием двух половин (заготовок), полученных литьем под давлением или вакуумформованием; б) раздуванием сжатым воздухом трубчатой заготовки, полученной литьем под давлением; в) раздуванием сжатым воздухом трубчатой заготовки, полученной выдавливанием в открытое пространство.

Производство объемных изделий свариванием или склеиванием предварительно отформованных заготовок не получило широкого распространения в промышленности из-за низкой производительности способа.

Изготовление объемных изделий из термопластов методом раздувного формования состоит из двух стадий: 1) получение

Рис. 1.66. Схема производства объемных изделий литьевым методом:



а — формирование заготовки литьем под давлением; б — термостатирование и предварительное раздувание; в — раздувание и охлаждение изделия; г — удаление изделия; 1 — механизм пластикации и впрыска; 2 — литьевая форма; 3 — форма для предварительного раздувания; 4 — форма для термостатирования; 5 — раздувная форма; 6 — изделие.

трубчатой заготовки и 2) раздувание трубчатой заготовки сжатым воздухом. Заготовку из термопласта для последующего раздувания можно получить, как

было сказано выше, литьем под давлением или экструзией, поэтому различают два метода производства раздувных объемных изделий: литьевой и экструзионный.

Сущность литьевого метода (рис. 4.66) заключается в следующем: термопласт, доведенный до вязкотекучего состояния в устройстве для нагрева и пластикации материала, впрыскивается под давлением в предварительно сомкнутую литьевую форму, внутри которой укреплен пустотелый сердечник. Трубчатая заготовка оформляется в зазоре между сердечником и внутренней поверхностью литьевой формы. Заготовка может быть отлита по форме, близкой к раздуваемому изделию. При литье нераздуваемые части (горловина, резьба, ручки, приливы и т. п.) могут полностью соответствовать готовому изделию. После оформления заготовки литьевая форма сразу же размыкается и сердечник вместе с горячей заготовкой переносится в раздувную форму. После смыкания полуформ раздувной формы через отверстия в сердечнике внутрь заготовки подается сжатый воздух, и заготовка раздувается по конфигурации оформляющей полости формы, при этом толщина стенок заготовки уменьшается, а ее размеры по сечению увеличиваются в 3—5 раз.

Изделие охлаждается подаваемым на раздувание холодным воздухом, а также при контакте с поверхностью оформляющей полости формы (полуформы охлаждаются водой). По окончании охлаждения изделий полуформы размыкаются, и изделие удаляется. Производство объемных изделий по литьевому методу требует значительных капитальных затрат ввиду высокой стоимости оборудования, а также из-за дополнительных расходов на изготовление дорогостоящих литьевых форм. Поэтому данный метод рекомендуется лишь для производства небольших емкостей крупных серий, несмотря на то, что качество изделий, раздуваемых из заготовок, полученных литьем под давлением, значительно выше, чем изделий, раздуваемых из заготовок, полученных методом свободной экструзии. Однако наибольшее распространение в промышленности получил экструзионный ме-

тод, обеспечивающий высокую производительность оборудования при сравнительно невысоких капитальных затратах.

Сущность экструзионного метода (рис. 4.67) состоит в следующем. Порошок или гранулы термопласта загружаются в бункер экструдера и захватываются вращающимся червяком. За счет механической энергии вращающегося червяка и тепла, подводимого к цилиндру экструдера нагревательными элементами, термопласт разогревается, пластицируется при интенсивном перемешивании и в размягченном состоянии выдавливается через формующий инструмент (прямоточную или угловую головку) в атмосферу в виде трубчатой или листовой заготовки. При достижении необходимой длины заготовки смыкаются полуформы раздувной формы. Внутри заготовки подается сжатый воздух, который обеспечивает ее раздувание. После охлаждения изделия форма размыкается и изделие удаляется.

Воздух на раздувание заготовок (рис. 4.68), полученных выдавливанием термопласта через формующий инструмент в атмосферу, может подаваться сверху через отверстие в дорне экструзионной головки, снизу через отверстие в формующем ниппеле, на который в процессе выдавливания надевается заготовка, или через дутьевую иглу.

Недостатком экструзионного метода производства объемных изделий раздуванием является неравномерная толщина стенок изделия (разнотолщинность), возникающая в результате разнотолщинности заготовки из-за ее вытяжки под действием собственного веса за время экструзии, а также из-за неравномерности температуры заготовки по высоте (более низкую температуру имеет нижняя часть заготовки, которая успевает значительно охладиться). Различие в толщинах стенок изделий круглого поперечного сечения по высоте достигает 30—40%, а для изделий других сечений — еще выше. Вторым недостатком этого метода является большое количество отходов — 50% от массы изделия.

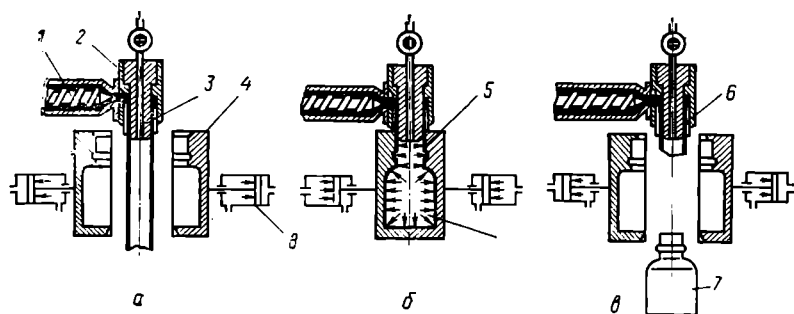


Рис. 4.67. Схема производства объемных изделий экструзионным методом: а — выдавливание заготовки; б — раздувание; в — съем изделия; 1 — экструдер; 2 — экструзионная головка; 3 — дорн; 4 — полуформа; 5 — заготовка; 6 — мундштук; 7 — изделие; 8 — привод полуформ.

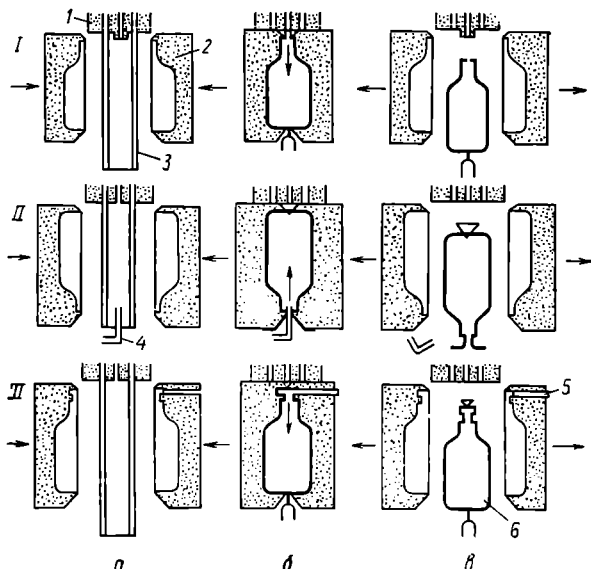


Рис. 4.68. Схемы раздувания заготовки сжатым воздухом, подаваемым сверху (I), снизу (II) или через дутьевую иглу (III):

a — смыкание формы; *б* — раздувание заготовки и охлаждение изделия; *в* — размыкание формы и съем изделия; 1 — экструзионная головка; 2 — полуформа; 3 — заготовка; 4 — дутьевый ниппель; 5 — дутьевая игла; 6 — изделие.

Использование отходов при переработке термопластов методом раздувного формования во многом определяет рентабельность производства. Однако возврат большого количества отходов может изменить вязкость расплава и насыпной массы смеси, тем более что часть отходов может перерабатываться по нескольку раз. Изменения реологических свойств зависят также от вида полимера, его качества и от условий раздувания.

Для раздувания игрушек и толстостенных промышленных деталей годится смесь с любым содержанием отходов (практически от 10 до 100%). Это обусловлено тем, что подобные изделия производятся из термопластов, не чувствительных к нагреванию и обычно с низкими температурами плавления. В производстве тонкостенных изделий допускается добавление не более 50% отходов, дальнейшее увеличение количества отходов вызывает значительное изменение вязкости расплава, в результате чего снижается качество изделий. Например, у хорошо стабилизированного полиэтилена показатель текучести расплава может уменьшаться на 10%, что в конечном счете приведет к колебаниям массы объемных изделий.

Кроме того, нельзя подавать в систему для переработки отходов, обслуживающую определенную технологическую машину, случайные отходы. Например, подача емкостей в систему, перерабатывающую облой, может вызвать колебания вязкости

расплава. Такие отходы необходимо перерабатывать на отдельной дробилке, а затем, перемешав их в небольших пропорциях с исходным материалом, подавать в бункера раздувных машин. И, наконец, количество отходов влияет также на насыпную массу смеси, колебания которой вызывают пульсацию производительности экструзионных машин. Следовательно, эксплуатационные свойства раздувных изделий будут определяться качеством гранулята — стабильностью его размеров и чистотой.

4.5.3. Классификация машин для производства объемных изделий раздуванием

В последнее время работы, связанные с производством объемных изделий методом раздувного формования, велись по двум направлениям: усовершенствование оборудования и поиски новых материалов. Созданы полностью автоматизированные агрегаты, в которые входят механические или пневматические транспортеры, автоматическое устройство для срезания облоя и заковки отверстий, устройства для пламенной обработки изделий и в некоторых случаях — для автоматической повторной переработки отходов. При необходимости машина может снабжаться испытательными и измерительными приборами, печатающими и упаковочными приспособлениями.

Основным параметром, по которому классифицируются раздувные агрегаты, является максимальный объем изготавливаемого изделия. Кроме того, в основу классификации раздувных агрегатов могут быть положены некоторые технологические и конструктивные признаки, такие, например, как метод получения заготовки, степень автоматизации, конструкция и род привода приемного устройства и т. д.

По методу получения заготовок и по конструкции устройства для нагрева и пластикации материала экструзионно-раздувные агрегаты делятся на агрегаты с копильником и без копильника.

В экструзионно-раздувных агрегатах без копильника устройство для нагрева, пластикации материала и выдачи заготовки представляет собой экструдер типовой конструкции с угловой или прямоточной головкой. Выдача раздувной заготовки производится вращающимся червяком экструдера. При этом скорость выдачи заготовки зависит от размеров последней и объемной производительности экструдера.

В экструзионно-раздувных агрегатах с копильником между червяком экструдера и головкой предусматривается промежуточная емкость, в которой накапливается расплав полимера, подаваемый непрерывно вращающимся червяком экструдера за время раздувания и охлаждения изделия в форме. После накопления расплав выдавливается из копильника с большой скоростью через формирующий инструмент под действием поршня копильника или осевого перемещения червяка, при этом выдача заготовки будет определяться только скоростью перемещения

Таблица 4.5. Характеристика различных раздувных машин

	Машина А	Машина Б	Машина В	Машина Г
Число форм	8	4	12	8
Время охлаждения изделия в форме, с	10	10	10	10
Полный цикл формования, с	12	12	20	13,3
Коэффициент использования формы, %	83,3	83,3	50	75
Эффективное число форм	$8 \cdot 0,833 = 6,66$	$4 \cdot 0,833 = 3,33$	$12 \cdot 0,50 = 6,0$	$8 \cdot 0,75 = 6,0$
Количество изделий, изготовленных за 1 ч	$6,66 \cdot 60 = 2400$	$3,33 \cdot 60 = 1200$	$6,0 \cdot 60 = 2160$	$6,0 \cdot 60 = 2160$

поршня или червяка. Экструзионно-раздувные агрегаты с копильником применяются в производстве крупногабаритных изделий и позволяют получать изделия с равномерной по высоте толщиной стенки.

По количеству рабочих позиций раздувные агрегаты разделяются на однопозиционные, двухпозиционные и многопозиционные — с несколькими комплектами форм и формирующих инструментов.

В связи с многообразием конструктивных схем раздувных агрегатов возникает вопрос: как оценить, какая конструктивная схема раздувного агрегата является оптимальной при производстве того или иного изделия?

Для оценки различных агрегатов необходимо прежде всего выбрать критерий сравнения. В качестве критерия оценки машин для производства изделий методом раздувного формования может быть принята их часовая производительность. Допустим, что на всех агрегатах производятся изделия из одного материала, одинаковой емкости и размеров, при одинаковой конструкции формирующего инструмента.

Чтобы выразить эффективность формы, введем коэффициент использования формы, определяемый как отношение (в процентах) периода времени от смыкания формы до начала ее размыкания к промежутку времени между двумя последовательными операциями смыкания формы.

При использовании стандартизованных форм и при допущении, что минимальный цикл охлаждения изделия 10 с, сравним работу четырех раздувных агрегатов (табл. 4.5). Машина А имеет две головки по четыре ручья в каждой и две четырехгнездных формы, поднимающиеся одновременно (или поочередно). Машина Б аналогична машине А, но в каждой головке по два ручья и две двухгнездных формы. У машины В стол с двенадцатью формами вращается вокруг горизонтальной оси, выдача заготовки происходит в верхнем положении, съем изделий —

в нижнем положении. У машины Г стол с восемью формами вращается вокруг горизонтальной оси, выдача заготовки происходит сбоку, съем изделий — в верхнем положении.

Из табл. 4.5 видно, что эффективность роторных машин в расчете на одну форму ниже, чем эффективность обычных машин с подъемным столом; эффективность уменьшается при увеличении цикла охлаждения и сдвига назад позиции, где происходит размыкание форм.

Если вместо стандартных изделий выпускать изделия, цикл охлаждения которых составляет 5 с, холостой цикл машин А и Б останется без изменения — 2 с, а у машин В и Г он уменьшится пропорционально времени охлаждения, так как позиция размыкания форм останется прежней. Однако работа машины Г при цикле охлаждения 5 с может оказаться теоретически более эффективной, чем работа машин А и Б. Это происходит в случае, если размыкание формы, съем изделия и смыкание займет 1,66 с (в машине А — 2 с).

Исходя из того, что холостой цикл всех машин составляет 2 с, максимальная производительность машины В будет достигнута, когда стол сделает пол-оборота за 2 с, а машины Г — когда за то же время ее стол совершит четверть оборота. Это соответствует минимальному циклу охлаждения изделия в машине В — 2 с (предельная величина), а машины Г — 6 с. При увеличении цикла охлаждения производительность роторной машины в расчете на одну форму станет ниже, чем обычной машины с подъемным столом. Чем больше цикл охлаждения изделия, тем выше коэффициент использования формы у машин с подъемным столом.

Рассмотренный пример показывает, что по эффективности использования форм только роторные машины, у которых размыкание формы происходит после оборота стола на 270° , могут сравниться с машинами с подъемным столом.

4.5.4. Компоновка и основные механизмы агрегатов

Выпускаемые раздувные агрегаты для производства объемных изделий из термопластов довольно разнообразны по компоновке основных механизмов (рис. 4.69). Это объясняется многими технологическими и конструктивными факторами: методами получения раздувных заготовок, размерами и конфигурацией изделий, повышением производительности агрегата и условиями непрерывности его работы, требованиями автоматизации производства и т. д.

На рис. 4.69, а показан наиболее распространенный вариант компоновки экструзионно-раздувного агрегата. Экструдер типовой конструкции расположен горизонтально, а угловая экструзионная головка позволяет обеспечивать выдачу трубчатой заготовки из термопласта вертикально вниз.

Приемное устройство в целях повышения производительности агрегата выполнено двухпозиционным, т. е. позволяет ис-

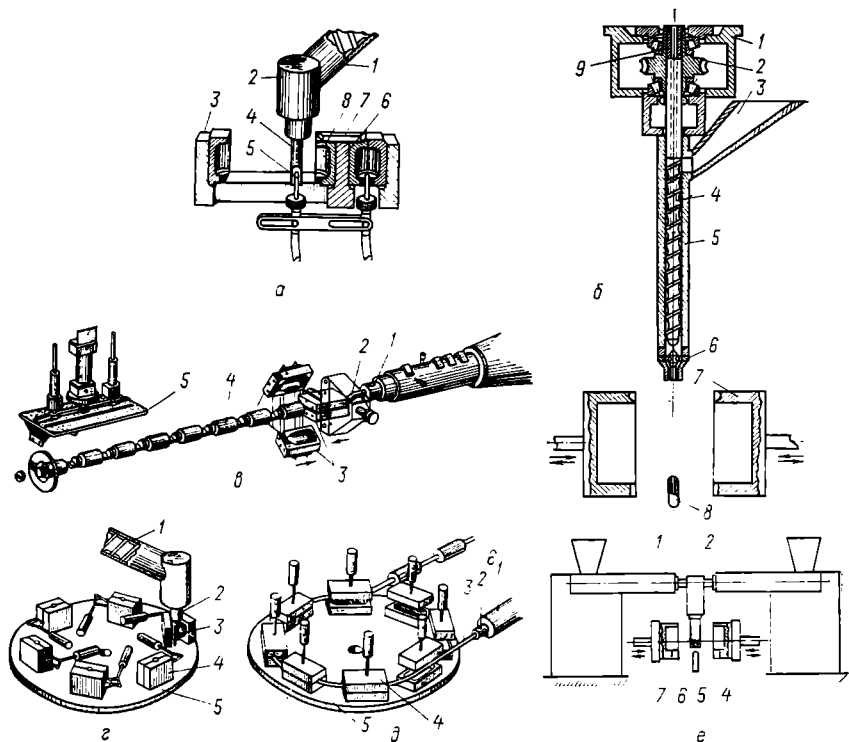


Рис. 4.69. Схемы экструзионно-раздувных агрегатов:

а — с горизонтальным расположением экструдера и угловой головкой (1 — экструдер; 2 — угловая головка; 3 — приемное устройство; 4 — заготовка; 5 — ниппель; 6 — подвижная плита; 7 — отрезной нож; 8 — полуформа); **б** — с вертикальным расположением экструдера (1 — станина; 2 — привод червяка; 3 — загрузочная воронка; 4 — червяк; 5 — цилиндр экструдера; 6 — экструзионно-раздувная головка; 7 — полуформа приемного устройства; 8 — ниппель; 9 — канал охлаждения червяка); **в** — с горизонтальным расположением экструдера и прямоточной головкой (1 — прямоточная головка; 2 — заготовка; 3 — полуформы; 4 — изделие; 5 — отделочное устройство); **г** — с многопозиционным приемным устройством (1 — экструдер; 2 — головка; 3 — заготовка; 4 — полуформа; 5 — стол приемного устройства); **д** — с роторным приемным устройством (1 — экструдер; 2 — экструзионная головка (трубная); 3 — трубчатая заготовка; 4 — раздувная форма; 5 — ротор; 6 — готовое изделие); **е** — с двумя экструдерами (1, 3 — экструдеры; 2 — угловая головка; 4 — приемное устройство; 5 — полуформа; 6 — ниппель; 7 — заготовка).

пользовать две раздувные формы. В этом случае формы попеременно подводятся под экструзионную головку: в то время как одна форма раскрыта и в нее подается заготовка, в другой форме происходит раздувание заготовки и охлаждение изделия.

Для экономии производственных площадей и улучшения условий выдачи заготовки применяются экструзионно-раздувные агрегаты с вертикальным расположением экструдера (рис. 4.69, б). При такой компоновке агрегата для формования заготовки используется прямоточная экструзионно-раздувная головка. Приемное устройство располагается горизонтально.

Кроме вертикального возможно и горизонтальное расположение основных механизмов раздувного агрегата (рис. 4.69, в). Расплавленный и гомогенизированный материал продавливается через формующий инструмент прямоточной головки 1. Конец трубчатой заготовки 2 захватывается полуформами 3, которые после смыкания двигаются совместно с заготовкой со скоростью, равной или превышающей скорость выдачи последней, что позволяет регулировать вытяжку заготовки и получать изделия с различной толщиной стенки. Для предотвращения смятия заготовок при смыкании полуформ в агрегате предусмотрен поддув заготовки изнутри. Как только произошло смыкание формы, в заготовку вводится дутьевая игла и под действием сжатого воздуха происходит формование изделия. После охлаждения изделия полуформы одной формы размыкаются, а другой смыкаются. Закрытая форма проходит между разомкнутыми полуформами первой формы, которые затем вновь смыкаются вокруг трубчатой заготовки. Таким образом, установка работает непрерывно.

Готовые изделия 4 поступают в отделочное устройство 5, где изделия отделяются одно от другого и удаляется избыточная часть горловины.

Для повышения производительности экструзионно-раздувных агрегатов применяются помимо двухпозиционных устройств многопозиционные — ротационные (рис. 4.69, г) или роторные (рис. 4.69, д) приемные устройства. В таких агрегатах используется экструдер высокой производительности, работающий непрерывно, и раздувная заготовка экструдируется через угловую головку вертикально вниз. Раздувные формы располагаются по периферии ротора. Число раздувных форм, установленных на роторе, определяется производительностью экструдера и временем раздувания и охлаждения изделия в форме.

На рис. 4.69, е дана схема экструзионно-раздувного агрегата для производства двухцветных или бипластмассовых изделий, включающего в себя два экструдера, которые подают расплав термопласта в одну угловую головку.

Трубчатая заготовка выдается вертикально вниз. По достижении требуемой длины она надевается на формующий ниппель, форма смыкается, и сжатый воздух подается на раздувание заготовки и охлаждение изделия. Экструдеры на это время выключаются. По окончании охлаждения форма размыкается, изделие удаляется, а экструдеры включаются в работу вновь и цикл повторяется.

Для сокращения времени выдачи заготовки с целью получения крупногабаритных изделий с равномерными по толщине стенками используют в экструзионно-раздувных агрегатах экструдеры с копильниками, которые могут выполняться как выносными, так и совмещенными с цилиндрами экструдера, причем компоновка этих агрегатов практически повторяет описанные выше.

Таким образом, основными механизмами экструзионно-раздувных агрегатов являются экструдеры, формующий инструмент с копильником или без него и приемные устройства различного конструктивного исполнения.

4.5.5. Формующий инструмент

Формующим инструментом в раздувных агрегатах называют устройства (экструзионные головки), которые обеспечивают формирование расплава термопласта в заготовку соответствующей геометрической формы и размеров, раздуваемую затем сжатым воздухом в объемное изделие.

Головка экструдера представляет собой отдельный сменный механизм, в котором устанавливаются детали, составляющие непосредственно формующий инструмент.

Для производства объемных изделий методом экструзии с раздуванием применяются в основном заготовки в виде листов и труб, поэтому ниже рассмотрены только конструкции головок для получения таких заготовок.

В производстве объемных изделий раздуванием большое значение имеет хорошая однородность расплава. На рис. 4.70 показана прямоточная трубная головка со специальным приспособлением для дросселирования потока расплава, обеспечивающая равномерный прогрев и пластикацию расплава. Дросселирование потока расплава, поступающего из экструдера по каналу, производится с помощью торпеды 3, аксиально перемещающейся при вращении шпинделя 4 в ту или другую сторону. Дорн, шпиндель и торпеда с помощью дорнодержателя крепятся к корпусу 2 головки.

Прямоточные экструзионные головки в производстве объемных изделий обычно применяются с вертикально расположенными экструдером или с копильником, в который расплав полимера нагнетается от горизонтально установленного экструдера. Такие головки обеспечивают равномерность линейной скорости экструзии по всему сечению формующего инструмента, что особенно важно для получения равнотолщинных изделий. Основным недостатком этих головок является наличие в них дорнодержателя. Дорнодержатель рассекает общий поток распла-

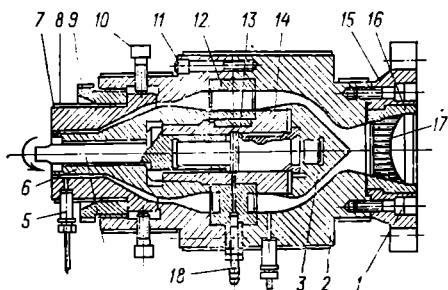
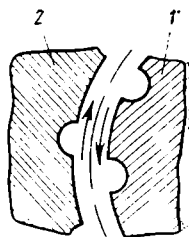


Рис. 4.70. Прямоточная головка с дросселированием потока расплава:

1 — присоединительный болт; 2 — корпус головки; 3 — аксиально перемещаемая торпеда; 4 — регулировочный шпиндель; 5 — термопара; 6 — наконечник дорна; 7 — сменный мунштук; 8 — электронагреватель; 9 — гайка; 10 — регулировочный болт; 11 — крепежный болт; 12 — дорнодержатель; 13 — шпонка; 14 — дорн; 15 — фланец; 16 — переходник; 17 — фильтрующая решетка; 18 — штуцер для подвода сжатого воздуха.

Рис. 4.71. Схема расположения винтовой нарезки:

1 — дорн с правой нарезкой; 2 — корпус с левой нарезкой.



ва на несколько потоков, которые, соединяясь вновь, образуют продольные швы на заготовке и в изделии. Швы неизбежно снижают в той или иной степени прочность изделия, а иногда даже заметны на его поверхности «линии спая». Поэтому конструкции дорнодержателя прямой точной головки уделяется особое внимание.

Существует несколько способов предотвращения образования продольных швов на изделии, один из которых показан на рис. 4.71. На дорне 1 выполнена правая многозаходная винтовая нарезка и на том же участке внутренней стенки корпуса 2 — левая многозаходная винтовая нарезка. Между выступами обеих нарезок имеется цилиндрический зазор. Когда термопластичный материал после дорнодержателя поступает в виде рукава с продольными швами и полосами в эту зону, то внутренние слои его подвергаются правому вращению, а наружные — левому. При этом средний слой рукава продолжает течение в первоначальном прямом направлении. Практическая проверка этого способа показала, что происходит полное сглаживание продольных швов и полос на изделиях. Такие факторы, как шаг и глубина резьбы, ширина зазора между нарезками на дорне и корпусе головки, имеют тем меньшее значение, чем больше длина сглаживающей зоны.

Наибольшее распространение при производстве объемных изделий нашли угловые головки. В угловых экструзионных головках поток расплавленного полимера, поступающий из винтового канала червяка в формующий инструмент, должен быть повернут перпендикулярно оси червяка, причем в конце поворота он должен вновь стать круговым и полностью симметричным по отношению к новой оси. При этом давление, скорость течения, температура и вязкость массы после поворота, т. е. перед выходной щелью формующего инструмента, не должны иметь каких-либо азимутальных неравномерностей.

Следует учитывать, что всякое изменение направления потока массы, растянутого в поперечной плоскости, обязательно приводит к различной длине пути отдельных струй, т. е. элементов поперечного сечения потока.

Отношение предельного изменения длины пути к средней длине пути прямо пропорционально кривизне среднего пути (т. е. обратной величине среднего радиуса кривизны) и не зависит от угла поворота:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{(r + a/2) \varphi - (r - a/2) \varphi}{r \varphi} = \frac{a}{r}$$

где r — радиус средней дуги; φ — угол поворота; l — длина средней дуги; a — толщина канала; Δl — разность длин дуги.

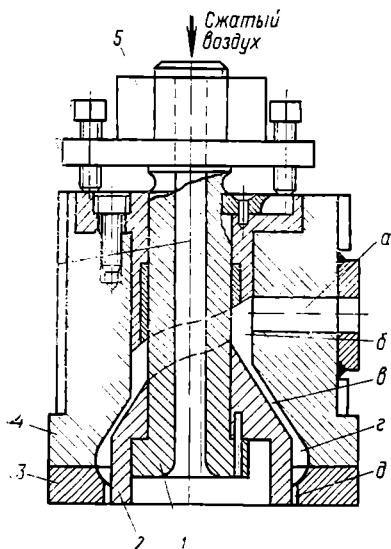


Рис. 4.72. Головка для получения трубчатой заготовки со скошенным конусом и составным дорном:

1 — дорн; 2 — наконечник дорна; 3 — мундштук; 4 — корпус головки; 5 — гайка регулирования зазора; а — канал для подвода расплава; б — сборный канал; в — конический кольцевой канал; г — выравнивающий канал; д — формирующий зазор; е — канал для подвода сжатого воздуха.

Указанные различия в длине пути потока расплава влияют на давление, температуру и вязкость полимера. Если не предусмотреть специальных мер, то после прохождения поворота может иметь место неравномерность соответствующих характеристик массы в плоскости, перпендикулярной к направлению ее движения. Это вызывается тем, что давление на выходном конце внутренней дуги поворота оказывается всегда более высоким, чем на выходном конце внешней дуги. В результате этого extrudированное изделие или будет искривляться, или будет иметь большую толщину стенки со стороны внутренней дуги поворота.

Проблема поворота потока расплава может быть практически решена при применении угловой головки, представленной на рис. 4.72. Поток расплава полимера поступает из кольцевого сборного канала в концентрическую щель мундштука через такую же концентрическую, но скошенную на приточной стороне коническую щель регулируемой толщины. Эта осесимметричная по длине коническая щель, к которой непосредственно примыкает щель мундштука, может быть отрегулирована в осевом направлении так, что выходящий из мундштука поток расплава полимера будет иметь по всей окружности одинаковую интенсивность. Таким образом, настройка достигается одноосным перемещением соответствующих деталей головки. При этом особую роль играет собственное сопротивление концентрической щели мундштука.

В головке (см. рис. 4.72) расплав полимера поступает через входной канал а. Затем он распределяется вокруг дорна 1 в кольцевом сборном канале б, расположенном наклонно к оси дорна и имеющем относительно большое поперечное сечение. При установившемся рабочем режиме падение давления расплава полимера между приточной ($\varphi=0$) и противоположной ($\varphi=\pi$) сторонами сборного канала происходит по определенному закону симметрично с обеих сторон дорна. Придаaniem сборному каналу соответствующих размеров можно добиться линей-

ного падения давления по закону

$$p = p_0 (1 - c\varphi)$$

где p — давление в произвольной точке в сборном канале; p_0 — давление со стороны притока; c — константа; φ — угол поворота расплава полимера вокруг дорна ($0 \leq \varphi \leq \pi$).

Из сборного канала b расплав полимера течет по всей окружности через конический кольцевой канал $в$, который имеет равномерную ширину, но различную для отдельных элементов окружности длину. Длина щели l имеет наибольшую величину l_0 на приточной стороне и непрерывно линейно уменьшается до величины l_π на противоположной стороне:

$$l = l_0 (1 - c'\varphi)$$

где c' — константа.

За этим участком пути расплава полимера следует обычно выравнивающий канал $г$ и формующий зазор $д$ между передней частью наконечника 2 дорна и мундштуком 3 . Кольцевой канал $в$ образован скошенной конической поверхностью наконечника 2 дорна и соответствующей конической выточкой в корпусе 4 . Наконечник дорна может быть цельным или состоящим из нескольких частей, причем с дорном 1 он может быть связан жестко или так, что его можно перемещать вдоль оси.

Для бесступенчатого регулирования толщины кольцевого канала предусмотрены нарезка на дорне и установочная гайка 5 . Вверх наконечник дорна перемещается с помощью упорных болтов фланца (заплечика) свободного конца дорна, а вниз — под действием давления расплава полимера в сборном канале $б$ и кольцевом канале.

Толщина формующего зазора мундштука при осевом регулировании конического кольцевого канала не изменяется. При этом происходит только некоторое смещение торцевой поверхности свободного конца дорна относительно торцевой поверхности мундштука. Это смещение не имеет большого значения, но все же с помощью мундштучных колец различной высоты величина этого смещения может быть снижена до минимума.

Если головку питать термопластичными материалами с различными реологическими свойствами, то оказывается, что для каждого материала требуется особая настройка скошенного конического канала, при которой скорость выходящей из формующего зазора массы будет одинакова по периметру. При такой настройке экструдруемый рукав имеет по всей окружности одинаковую толщину. Всякое уменьшение зазора увеличивает толщину рукава на левой стороне, а его расширение увеличивает толщину рукава на правой стороне. В противоположность обычным конструкциям головок, в которых для получения равномерной толщины стенок изделия требуется обязательно двухмерное регулирование формующего зазора мундштука с помощью минимум трех установочных болтов, в указанной голов-

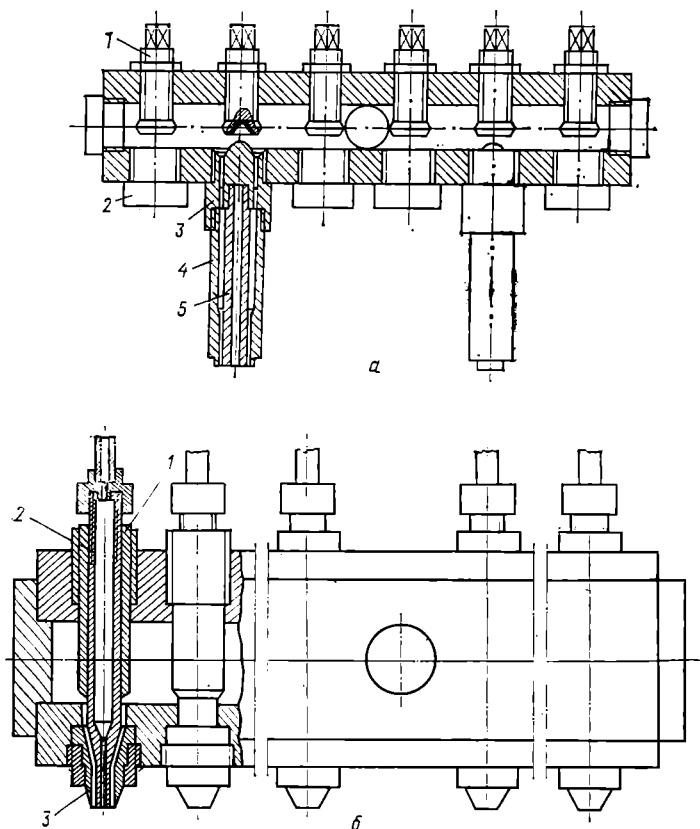


Рис. 4.73. Многоручьевая экструзионная головка:

a — с дросселированием подводящего канала (1 — регулировочный винт; 2 — пробка; 3 — корпус-переходник; 4 — мундштук; 5 — дорн); *б* — с изменением поперечного сечения формующего канала (1 — винт регулировки зазора; 2 — дорн; 3 — мундштук).

ке для этой цели достаточно одномерного осевого регулирования.

Кроме того, угловая головка, показанная на рис. 4.72, позволяет, как правило, работать с более жесткими допусками по толщине в сравнении с другими головками. Благодаря равномерному напряжению сдвига по окружности поперечного сечения потока материала, достигаемому концентрической установкой выравнивающей и выходной щелей, такая головка обеспечивает лучшие показатели механических и других характеристик готовых изделий.

В экструзионных раздувных агрегатах для получения изделий небольшой емкости применяются многоручьевые головки (рис. 4.73), которые обеспечивают одновременную выдачу нескольких заготовок. Основной недостаток таких головок заключается в том, что из-за разной удаленности отдельных выход-

ных каналов (ручьев) от питающего возникают различия в линейной скорости выдачи трубчатых заготовок. Для выравнивания скорости выдачи заготовок регулируют давление в каждом канале головки дросселированием (см. рис. 4.73, а) или изменением поперечного сечения канала, из которого поступает расплав (рис. 4.73, б).

Для получения объемных изделий используется способ раздувания двух плоских заготовок, получаемых с помощью двухручьевых плоскощелевых головок. Применение плоских заготовок в производстве объемных изделий позволяет: 1) достичь равнотолщинности по периметру изделия; 2) получать изделия нецилиндрической формы без изменения конфигурации оформляющего канала формирующего инструмента. Недостатком метода следует считать наличие линии сая, проходящей вдоль образующей изделия. Основной проблемой при конструировании плоскощелевых головок является уменьшение неравномерности потока по ширине щели. Существует несколько способов выравнивания потоков расплава. Наилучшие результаты дает способ, заключающийся в применении регулируемых (управляемых) преград — сопротивлений.

Принцип действия двухручьевой головки (рис. 4.74) следующий: расплав полимера из переходника 1 поступает в коллектор 2 головки, в котором происходит предварительное выравнивание скорости потока по ширине головки. Окончательное выравнивание производится с помощью преград 4, управляемых

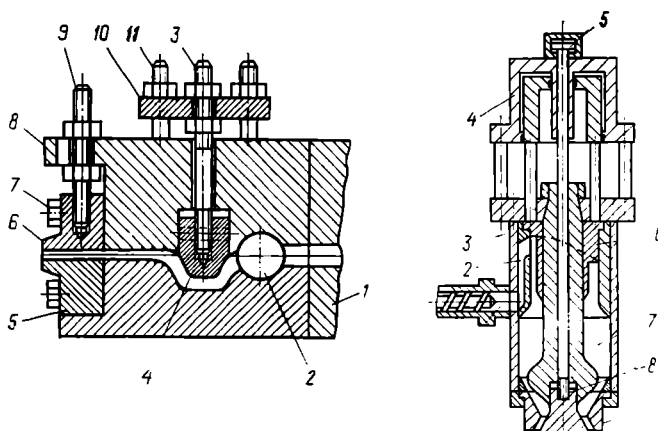


Рис. 4.74. Плоскощелевая экструзионная головка с упругодеформируемой планкой:

1 — переходник; 2 — коллектор; 3 — регулировочный шпindel; 4 — преграда; 5, 6 — сменные губки; 7, 11 — крепежные болты; 8 — корпус; 9 — болт регулировки высоты щели; 10 — опорная планка.

Рис. 4.75. Экструзионная головка с копильником и регулируемым зазором:

1 — экструдер; 2 — подводящий канал; 3 — корпус головки; 4 — привод копильника; 5 — привод регулировки зазора; 6 — поршень копильника; 7 — копильная камера; 8 — подвижный дорн; 9 — мундштук.

регулируемыми шпинделями 3. Для оформления расплава полимера в плоскую заготовку служат сменные губки 5 и 6. Высоту зазора между губками можно менять с помощью болтов 7, перемещаемых в резьбовой втулке. Корпус головки выполняется обычно составным.

При производстве крупногабаритных объемных изделий в экструзионно-раздувных агрегатах с целью увеличения скорости выдачи заготовки применяются как вертикально, так и горизонтально расположенные копильники. При вертикальном расположении копильника (рис. 4.75) качество выдавливаемой заготовки выше, так как отсутствует поворот потока расплава, и в них значительно меньше застойных зон. Работа копильного устройства заключается в следующем. Расплав из экструдера 1 через подводящий канал 2 поступает в копильную камеру 7, расположенную в корпусе головки 3. Под действием давления расплава поршень 6 поднимается вверх. Как только накопилась необходимая порция расплава, с помощью привода 4 поршень выдавливает заготовку. В приведенной схеме копильного устройства использованы конические мундштуки 9 и дорн 8, взаимное перемещение которых с помощью привода 5 позволяет изменять толщину стенки заготовки в процессе ее выдачи.

Общие принципы, которыми руководствуются при конструировании экструзионных головок, сводятся к следующему: внутренние полости, по которым течет расплав полимера, должны обеспечивать равномерный поток его, без резких переходов, без наличия «мертвых» зон (застойных пространств), которые могут привести к перегреву и даже разложению полимера, и иметь высокое качество чистоты обработки поверхности.

Одним из основных видов расчетов формирующего инструмента является расчет его гидравлического сопротивления. Цель гидравлического расчета формирующего инструмента — определить зависимость между перепадом давления по длине канала, производительностью и геометрическими размерами канала. Поскольку размеры сечения канала зависят от формы изделия и, очевидно, в расчете принимаются неизменными, гидравлическим расчетом определяется для конкретного мундштука связь перепада давления, производительности и длины оформляющего канала.

Эти величины для ньютоновской жидкости связаны простым соотношением:

$$Q = k \Delta p / \eta \quad (4.135)$$

где Q — объемный расход; k — коэффициент геометрической формы канала; Δp — перепад давления по длине канала; η — вязкость.

Для канала с сечением любой конфигурации, неизменным по длине, k определяется как

$$k = F^3 / 2l\Pi^2$$

где F — площадь поперечного сечения канала; Π — периметр сечения канала; l — длина канала.

Некоторая неточность такого расчета очевидна, так как для неньютоновской жидкости любой выбранный коэффициент вязкости будет всего лишь «усредненным» по отношению к эффективной вязкости, зависящей от градиента скорости. Однако этот упрощенный метод расчета можно считать достаточно точным для конструкторских целей.

4.5.6. Раздувные формы

При изготовлении объемных изделий раздуванием из полимерных заготовок применяются формы из двух половин (рис. 4.76). Каждая полуформа 5, 13 имеет полость для формования изделия. Основным назначением формы в производстве изделий методом раздувания является оформление изделий. Однако форма выполняет и ряд других функций: зажим заготовки 4 пресс-кантами 3, 14, калибровку горловины изделия ниппелем 8 и пресс-кантами 17, регулировку направления подачи воздуха 9 для раздувания, заварку отверстий, удаление обоя пресс-кантами 1, 18 и т. д.

Для калибровки горловины изделия используют дутьевые ниппели (рис. 4.77) двух типов: гладкие цилиндрические (рис. 4.77, а) или ступенчатые (рис. 4.77, б). В обоих случаях предотвращается утечка воздуха из раздувной заготовки. В первом случае ниппель обжимается пресс-кантом 2 по его периметру, в другом — выступ ниппеля обжимается горловиной частью раздувной формы 4.

Качество раздувного изделия в значительной мере определяется конструкцией пресс-кантов и зажимных карманов. Дли-

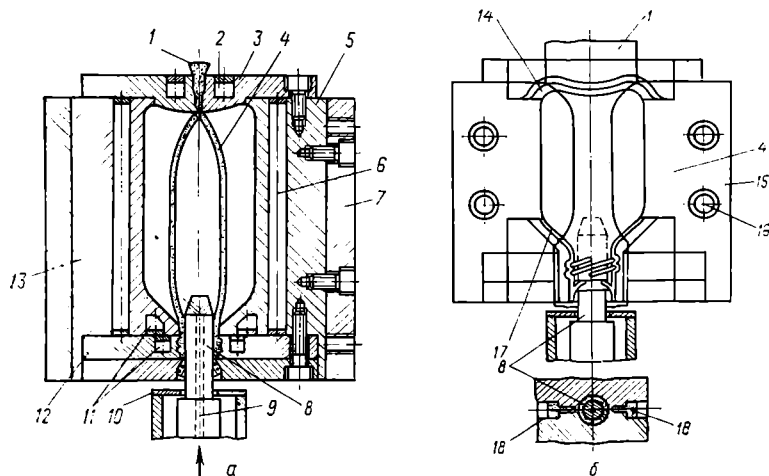


Рис. 4.76. Форма для изготовления объемных изделий:

а — главный вид; б — вид сбоку; 1, 18 — облой; 2, 6, 11 — каналы охлаждения; 3 — днище полуформы; 4 — заготовка; 5, 13 — полуформы; 7 — плита; 8 — ниппель; 9 — канал для подачи сжатого воздуха на раздувание; 10 — съемная планка; 12 — крышка полуформы; 14, 17 — пресс-кант; 15 — плоскость разъема полуформы; 16 — направляющая колонка.

ну пресс-кантов и объем зажимных карманов следует выбирать так, чтобы при закрытии формы не образовывалась пленка в плоскости разъема формы. Сварные кромки не должны быть острыми, их ширина выбирается в зависимости от вида перерабатываемого материала, толщины стенки изделия, величины зажимного угла, скорости и усилия запираения формы.

Зажимной карман, расположенный за пресс-кантом, образуется обеими половинами формы при их смыкании. Глубина кармана в каждой половине формы должна составлять около одной толщины стенки изделия. Применяются также формы с односторонними зажимными карманами.

С увеличением толщины стенки изделия труднее получить хорошую свариваемость заготовки пресс-кантами, что особенно существенно при изготовлении емкостей, работающих под давлением. Для улучшения свариваемости рекомендуется у пресс-кантов, по которым должна обрезаться деталь, делать прибыли (рис. 4.78) Возможны следующие варианты:

1) двухсторонняя прибыль (рис. 4.78, а, г); пресс-канты и ограничивающие перегородки прибыли должны быть возможно более острыми, в противном случае потребуется большое усилие смыкания формы; размер выбирается в зависимости от толщины заготовки;

2) односторонняя прибыль (рис. 4.78, б); преимущество ее — незначительная стоимость формы, особенно, если предусмотреть замену пресс-канта;

3) оформление сварного шва без прибыли (рис. 4.78, в) применяется только тогда, когда длина сварного шва невелика; надежная работа этой конструкции во многом зависит от усилия смыкания формы.

В производстве объемных изделий методом экструзии с раздуванием большую трудность представляет снятие облоя и прибыли с готового изделия. Снятие облоя осуществляется двумя способами: во время формования, т. е. внутри формы, или после удаления изделия, т. е. вне формы. Первый способ приме-

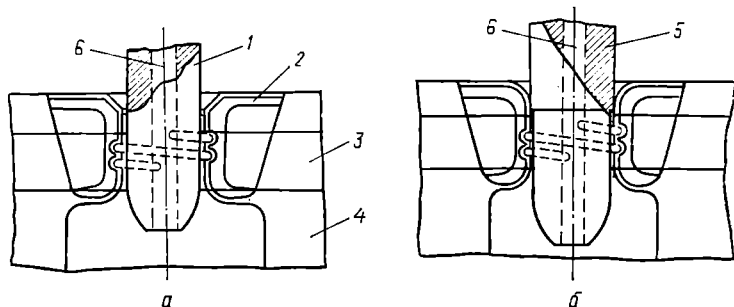


Рис. 4.77. Схема калибровки горлышка бутылки:

а — калибровка гладким дорном; б — калибровка ступенчатым дорном: 1 — дорн; 2 — пресс-кант; 3 — резьбовой вкладыш; 4 — оформляющая полость формы; 5 — ступенчатый дорн; 6 — воздушный канал.

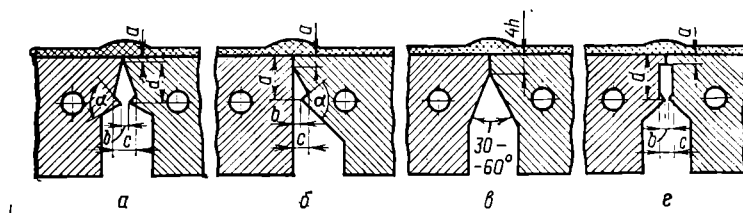


Рис. 4.78. Размеры режущей кромки формы (h — толщина заготовки):

a , $г$ — пресс-каты с двухсторонней «прибылью»; $б$ — пресс-каты с односторонней «прибылью»; $в$ — пресс-каты без «прибыли»; $a = (0,5 + 1,0)h$; $б = h$; $с = (1,5 + 3)h$; $д = (12 + 18)h$; $α = 60 + 90^\circ$.

ним, если обрезка облоя внутри формы происходит в короткий отрезок времени (рис. 4.79). Когда полуформы 4 начинают раскрываться, отформованное изделие 3 и облой 1 разделяются, причем изделие остается на одной полуформе, а облой на другой. Когда форма открывается полностью, изделие и облой выталкиваются.

Для обеспечения точного смыкания раздувных форм в них предусматриваются направляющие колонки. Эти колонки изготавливаются из высококачественной стали и должны иметь твердость HRC 56—60. Для втулок, по которым скользят колонки, применяется такая же сталь с последующей термообработкой в масле до твердости HRC 55—58. Целесообразно втулки запрессовывать не в глухие отверстия в корпусе формы, а крепить их в сквозных отверстиях, фиксируя дополнительно сухарями.

На качество изделия влияет температура формы, которая регулируется системой охлаждения. Для охлаждения форм применяются в основном две системы: канальная и камерная. Кроме того, раздувные формы должны иметь вентиляционные каналы (рис. 4.80) для вывода воздуха из пространства между раздуваемой заготовкой и оформляющей поверхностью формы; противостоять высоким температурам и выдерживать быстрые циклические изменения температуры; выдерживать усилие запирания, учитывая, что давление воздуха, подаваемого на раздувание заготовки, может изменяться от 0,3 до 1,0 МПа. При выборе материала для изготовления формы кроме изложенных требо-

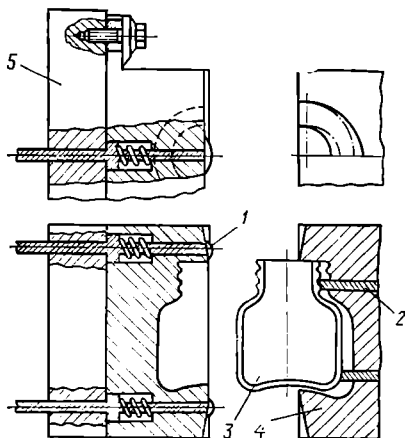


Рис. 4.79. Схема отделения облоя от изделия:

1 — выталкиватель облоя; 2 — выталкиватель изделия; 3 — изделие; 4 — раздувная полуформа; 5 — раздувная приставка.

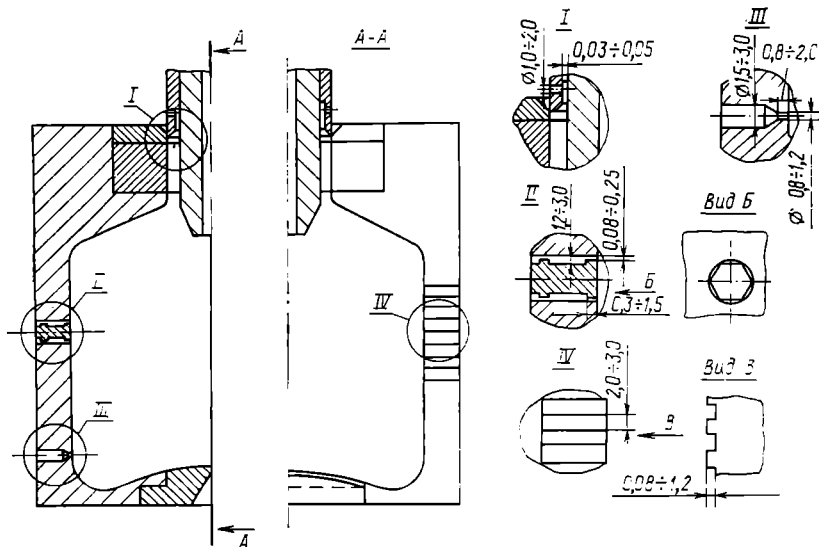


Рис. 4.80. Схема расположения вентиляционных каналов в раздувной форме.

ваний необходимо учитывать специфические особенности перерабатываемого полимера и технологические особенности процесса производства объемных изделий.

С целью получения исходных данных для профилирования экструзионных заготовок и конструирования форм необходимо рассмотреть деформационное поведение экструзионных заготовок в процессе раздувного формования [127, 128].

Основную долю емкостей, изготавливаемых из полимерных материалов методом экструзии с раздуванием, составляют бочки для химикатов, горючего, бутылки для молока и масел, флаконы для лекарств и косметики и т. п. Около 80% из них представляют собой емкости простой конфигурации (рис. 4.81): осесимметричные оболочки в виде кругового усеченного конуса, цилиндра или их комбинаций. С целью классификации данных изделий введем понятие коэффициент формы k_ϕ :

$$k_\phi = \frac{H(1 + \cos \beta)}{2a \sin \beta} = \frac{c}{2a} (1 + \cos \beta) \quad (4.136)$$

где H и a — высота и максимальный радиус кругового усеченного конуса соответственно; β — угол наклона образующей к основанию конуса радиуса a .

Если формируемое изделие имеет $k_\phi > 1$ (изделие первого типа, показанное на рис. 4.81, а), то его формование состоит из следующих последовательных стадий: 1) «свободное» раздувание заготовки; 2) формование боковой поверхности изделия; 3) совместное формование боковой поверхности и дна изделия.

При $k_{\Phi}=1$ вторая стадия процесса раздувания отсутствует.

Если формируемое изделие имеет $k_{\Phi}<1$ (изделие второго типа, показанное на рис. 4.81, б), то его формование состоит из следующих последовательных стадий: 1) «свободное» раздувание заготовки; 2) совместное формование крышки и днища изделия; 3) совместное формование боковой поверхности и днища изделия.

Анализ процесса раздувного формования исследуемых изделий показывает существенное различие в поведении заготовок, поэтому для описания их деформационного поведения необходимо рассматривать все стадии процесса, принимая следующие допущения:

1) деформационное поведение равнотолщинной заготовки на всех стадиях процесса формования характеризуется однородностью, изотермичностью и осесимметричностью, что позволяет рассматривать плоскую задачу (см. рис. 4.81, $W=0$);

2) при «свободном» раздувании заготовка деформируется таким образом, что в плоскости $W=0$ в любой момент времени образующая поверхности заготовки является частью окружности, проходящей через две стационарные и одну текущую точку (стационарные точки соответствуют защемлению заготовки пресс-кантами формы), а при образовании той или иной поверхности изделия деформируемая заготовка сопрягается с формообразующей поверхностью формы;

3) в месте контакта формы с поверхностью заготовки последняя мгновенно охлаждается, при этом отсутствуют утечки материала и нет проскальзывания заготовки относительно формы;

4) материал заготовки представляет собой вязкую несжимаемую жидкость.

При формовании изделий с $k_{\Phi}>1$ (рис. 4.82) на стадии «свободного» раздувания происходит касание заготовки с боковой поверхностью формы в точке $B(x_B, y_B)$ с формированием начальной толщины изделия (рис. 4.82, а).

В результате на данной стадии процесса раздувания задача будет сводиться к нахождению координат точки касания $B(x_B, y_B)$ и определению значения t_0 . Для нахождения координат точки касания необходимо решить совместно уравнение образующей кругового усеченного конуса и уравнение поверхности деформируемой заготовки. Решив систему уравнений, находим значение искомой абсциссы точки

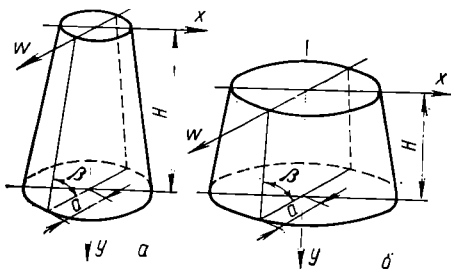


Рис. 4.81. Основные типы полых осесимметричных изделий:

а — изделие первого типа ($k_{\Phi}>1$); б — изделие второго типа ($k_{\Phi}<1$).

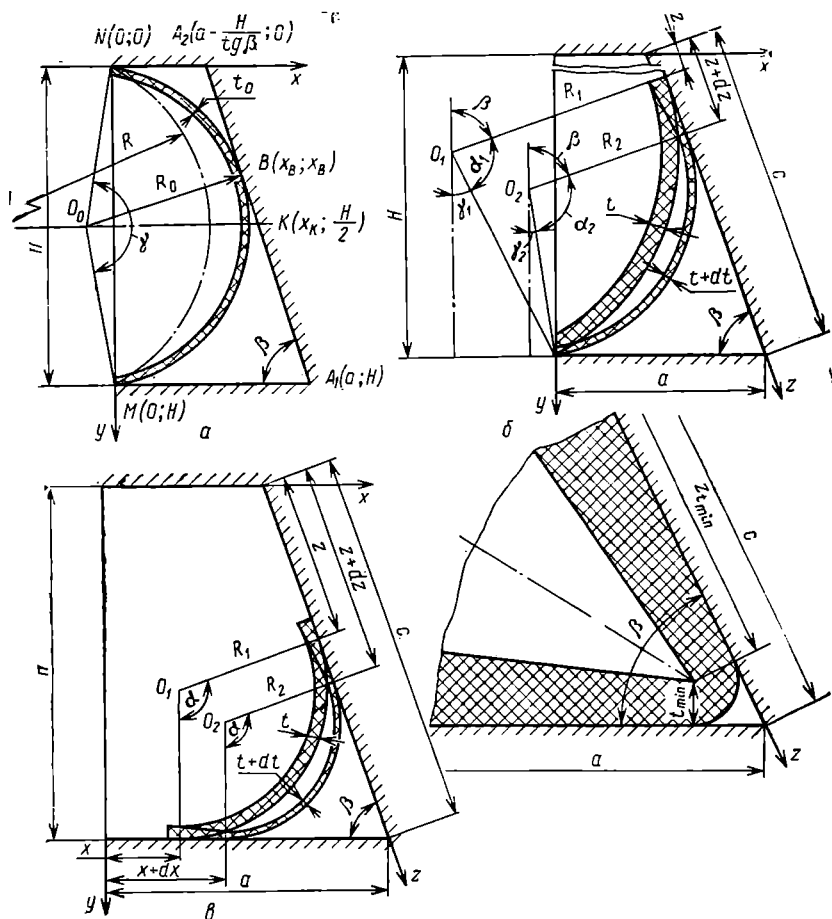


Рис. 4.82. Стадии процесса раздувания заготовки:

а — образование начальной толщины изделия при «свободном» раздувании заготовки; б — изменение толщины боковой стенки изделия; в — изменение толщины стенок изделия в тупиковой зоне; г — образование минимальной толщины изделия.

касания и начальную толщину изделия:

$$x_B = \frac{\sqrt{a(1 + 1/\operatorname{tg}^2 \beta)(a - H/\operatorname{tg} \beta)}}{1 + 1/\operatorname{tg}^2 \beta} \quad (4.137)$$

$$t_0 = \frac{H(2R_3 - t_3)t_3}{\frac{x_K^2 + H^2/4}{x_K} \left[H + \frac{x_K^2 - H^2/4}{x_K} \arcsin \left(\frac{H}{x_K^2 + H^2/4} x_K \right) \right]} \quad (4.138)$$

Вторая стадия процесса формования изделия (рис. 4.82, б) может быть описана следующим уравнением

$$\frac{t_x}{t_0} = \frac{Ax_0^4 + Bx_0^3 + Cx_0^2 - Dx_0 + 1}{Ax^4 + Bx^3 + Cx^2 - Dx + 1} e^{-I} \quad (4.139)$$

где

$$I = \int_{x_0 = \frac{c-z_0}{a}}^{x = \frac{c-z}{a}} \frac{D - 4K(1 - x \cos \beta)}{Ax^4 + Bx^3 + Cx^2 - Dx + 1} dx \quad (4.140)$$

причем безразмерные коэффициенты A , B , C , D и K , характеризующие геометрию формы, равны:

$$\begin{aligned} A &= 1 - 2 \frac{\sin(\pi - \beta)}{\cos \beta + 1 + \sin \beta [\sin \beta + (\pi - \beta)]} \\ B &= \frac{2 \cos \beta [(\pi - \beta) \sin \beta - 2(\cos \beta + 1)]}{\cos \beta + 1 + \sin \beta [\sin \beta + (\pi - \beta)]} \\ C &= \frac{2 \cos \beta [1 + \cos \beta (3 + 2 \cos \beta)]}{\cos \beta + 1 + \sin \beta [\sin \beta + (\pi - \beta)]} \\ D &= \frac{2 \cos \beta [2(\cos \beta + 1) + (\pi - \beta) \sin \beta]}{\cos \beta + 1 + \sin \beta [\sin \beta + (\pi - \beta)]} \\ K &= \frac{\sin^2 \beta}{\cos \beta + 1 + \sin \beta [\sin \beta + (\pi - \beta)]} \end{aligned} \quad (4.141)$$

Выражение (4.139) описывает изменение толщины боковой поверхности изделия в зависимости от геометрических параметров формы, причем значение начальной толщины t_0 определяется уравнением (4.138), а границы интегрирования определяются следующим образом. По уравнению (4.137) определяется координата касания поверхности заготовки с боковой поверхностью формы x_B . Далее используя зависимость между координатами x и z для боковой поверхности $x = a - (c - z) \cos \beta$, можно определить нижнюю границу интегрирования:

$$x_0 = \frac{c - z_0}{a} = \frac{1 - \frac{x_B}{a}}{\cos \beta} \quad (4.142)$$

Верхняя же граница интегрирования определяется последующим процессом совместного формообразования боковой поверхности и днища полого изделия; с учетом условия симметрии данного процесса максимальное значение верхней границы интегрирования определится как:

$$x = \frac{c - z}{a} = 1 \quad (4.143)$$

На третьей стадии процесса происходит одновременное образование боковой поверхности и днища (рис. 4.82, в). Согласно изложенным допущениям, имеем

$$\frac{t_z}{t_0} = \frac{1}{\left[\frac{c}{a} \left(1 - \frac{z}{c} \right) \right]^{\frac{N}{2B}} \left\{ \frac{c}{a} \left[1 - \frac{\pi - \beta}{\sin \beta} \right] \left(1 - \frac{z}{c} \right) + \frac{\pi - \beta}{\sin \beta} \right\}^{\frac{M}{C} - \frac{N}{2B}}} \quad (4.144)$$

где безразмерные коэффициенты, характеризующие геометрию формы, равны:

$$\frac{N}{2B} = 1 + \frac{2}{(\pi - \beta) \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \quad (4.145)$$

$$\frac{M}{C} = 2 \left[1 + \frac{\cos^2 \frac{\beta}{2}}{2 \sin^2 \frac{\beta}{2} - (\pi - \beta) \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \right]$$

Для определения изменения толщины изделия по днищу достаточно использовать связь между координатами x и z , которая для плоского днища запишется как $x = a - (c - z)$. Значение начальной толщины определяется по зависимости (4.139) как текущее значение толщины при максимальном значении верхней границы интегрирования.

Согласно уравнению (4.144), при $z \rightarrow c$ отношение $t_z/t_0 \rightarrow 0$ (так как значение $N/2B$ отрицательно во всей области изменения β). Однако общеизвестно, что раздувные изделия в окрестности точки $z \rightarrow c$ имеют минимальную конечную толщину. Определить ее по уравнению (4.144) не представляется возможным, поскольку данное уравнение описывает изменение толщины боковой поверхности и днища изделия, а окрестность точки $z \rightarrow c$ принадлежит им одновременно (рис. 4.82, z).

Для определения минимальной толщины $t_{\min}$ по уравнению (4.144) необходимо знать координату $z_{t \min}$, которая, согласно (рис. 4.82, z), определится следующим образом:

$$z_{t \min} = c - t_0 \frac{f(z_{t \min})}{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \quad (4.146)$$

Уравнение (4.146) не определяет координату $z_{t \min}$ в явном виде, поэтому для ее определения может быть предложен метод последовательных приближений. Так как раздувные изделия тонкостенны, то задаваясь в первом приближении $z = 0,9c$, определяем значение по уравнению (4.144) и подставляем в него соотношение (4.146), определяя $z_{t \min}$.

При формовании изделий с $k_\Phi < 1$ с учетом принятых допущений на стадии свободного раздува происходит касание заготовки с днищами формы (рис. 4.81, b) с образованием начальной толщины изделия, причем значение абсциссы в этот момент для раздутой заготовки равно $x = H/2$. Подставив величину абсциссы в уравнение (4.138), получили значение начальной толщины:

$$t_0 = (2R_3 - t_3) t_3 / H \quad (4.147)$$

На второй стадии процесса формования изделия происходит совместное образование крышки и днища изделия, при этом

уравнение, описывающее изменение толщины стенки, имеет вид:

$$\frac{t_x}{t_0} = \exp \left(-\frac{4}{\pi H} x \right) \left(1 + \frac{\pi}{H} x \right)^{\frac{4}{\pi^2} - 1} \quad (4.148)$$

Значение аргумента лежит в пределах $0 \leq x \leq a - \frac{H}{2} \frac{\cos \beta + 1}{\sin \beta}$.

Касание заготовки с боковой поверхностью формы произойдет в точке B с координатами

$$x_B = a - \frac{H}{2 \operatorname{tg} \beta} (\cos \beta + 1) \quad (4.149)$$

$$y_B = \frac{H}{2} (1 - \cos \beta)$$

Поскольку третьи стадии процесса формования объемных изделий обоих типов совпадают, то дальнейшее изменение толщины боковой поверхности и днища изделия при их совместном образовании будет подчиняться зависимости (4.144).

На основании изложенного может быть предложена следующая методика расчета и конструирования раздувных осесимметричных изделий и форм с учетом заданного параметра однородности толщины изделия.

1. По заданной геометрии изделия — H , $t_{\min}$, a и β — согласно уравнению (4.136), определяется значение k_Φ , а значит, и последовательность стадий его формования.

2. Для случая $k_\Phi \geq 1$ в соответствии с уравнением (4.139) рассчитывается конечное значение отношения $t_1/t_0 = K_1$ (вторая стадия процесса), причем нижняя граница интегрирования в уравнении (4.139) определяется согласно уравнению (4.137).

3. Далее по уравнению (4.144) с учетом полученного значения K_1 и условия (4.146) определяется параметр однородности толщины изделия $t_{\min}/t_0 = K_1 f(z_{t_{\min}})$ и сравнивается с заданным значением $t_{\min}/t_0 \geq K$. Если $K_1 f(z_{t_{\min}}) \geq K$, то конструируемая форма будет соответствовать конфигурации изделия с учетом термической усадки материала.

4. Если $K_1 f(z_{t_{\min}}) < K$, т. е. параметр однородности толщины изделия не соответствует заданному, то необходимо определить значение координаты z_K , при которой бы выполнялось заданное условие $t_{z_K}/t_0 = K_1 f(z_{t_{\min}})$. С этой целью в уравнение (4.144) последовательно подставляются значения $z_i < z_{t_{\min}}$ (шаг $\Delta z_i = 0,01 \div 0,05$ с) до выполнения условия $t_{z_K}/t_0 = K_1 f(z_K) = K$.

5. Определив координату z_K , при которой выполняется заданное условие однородности толщины изделия, легко определить и значение радиуса скругления тупиковой зоны $r_c = (c - z_K) \operatorname{tg}(\beta/2)$, который учитывается в процессе конструирования раздувной формы.

6. Далее по известной величине $t_{\min}$ определяется значение начальной толщины изделия $t_0 = t_{\min}/K = t_{z_K}/K = t_{r_K}/[K_1 f(z_K)]$.

7. Полученное значение начальной толщины t_0 , согласно уравнению (4.138), позволяет определить параметры экструзионной заготовки R_3 и t_3 , причем последние служат исходными данными для расчета формующего инструмента.

Проведенный анализ процесса раздувного формования позволяет не только рассчитывать изменение толщины заготовки при раздувном формовании полых осесимметричных изделий, но и более обоснованно подходить к вопросам расчета и конструирования раздувных изделий и форм.

4.5.7. Приемные устройства

Одними из основных механизмов агрегатов для производства объемных изделий из термопластов раздуванием, наряду с генераторами расплава и формующим инструментом, являются приемные устройства.

Приемные устройства раздувных агрегатов выполняют следующие технологические и вспомогательные операции: 1) перемещение форм к формующему инструменту на прием заготовки; 2) смыкание раздувных форм; 3) запираание форм; 4) отрезку заготовки у экструзионной головки; 5) подачу воздуха для раздувания заготовки; 6) отвод формы от формующего инструмента; 7) охлаждение изделия; 8) размыкание формы и съем готового изделия.

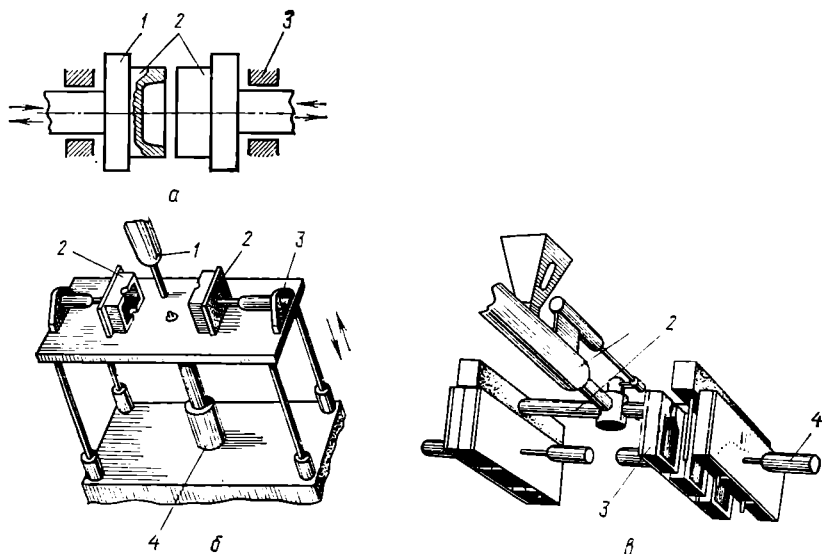


Рис. 4.83. Принципиальные схемы приемных устройств раздувных агрегатов: а — однопозиционное с неподвижным столом (1 — раздувная приставка; 2 — раздувные полуформы; 3 — стол); б — однопозиционное с подвижным столом (1 — головка, 2 — раздувные полуформы, 3 — стол, 4 — привод стола); в — двухпозиционное (1 — экструдер, 2 — двухручьевая экструзионная головка, 3 — раздувные полуформы, 4 — привод).

В связи с многообразием конструкций приемных устройств раздувных агрегатов целесообразно классифицировать их по ряду признаков.

По числу рабочих позиций приемные устройства (рис. 4.83) разделяются на однопозиционные с неподвижным столом (рис. 4.83, *а*), однопозиционные с подвижным столом (рис. 4.83, *б*), двухпозиционные (рис. 4.83, *в*) и многопозиционные (рис. 4.83, *г, д*). В большинстве случаев позиционность приемного устройства определяется числом одновременно установленных раздувных форм.

Однопозиционные приемные устройства с неподвижным столом (рис. 4.83, *а*) целесообразно использовать в раздувных агрегатах для производства крупногабаритных объемных изделий. В таких агрегатах прием раздувной заготовки из термопласта, ее раздувание, охлаждение и съем готового изделия осуществляется в одной позиции и в одной раздувной форме. Генератор расплава (экструдер или червячный пластикатор) этих агрегатов снабжается копильником, куда поступает расплав полимера во время раздувания и охлаждения изделия в форме. При этом время нагрева и пластикации очередной дозы расплава, накапливаемой в копильнике, должно быть равно времени раздувания, охлаждения и удаления готового изделия из формы.

В результате синхронизации работы генератора расплава и приемного устройства все механизмы агрегата работают непрерывно, и, таким образом, обеспечиваются высокая производительность и эффективность использования оборудования. Однопозиционные приемные устройства применяют также в агрегатах и без копильных устройств (рис. 4.83, *б*). В таких агрегатах приемные устройства (стол 3) подаются с помощью пневмо- или гидроцилиндров 4 к формующему инструменту 1 для приема раздувной заготовки и отводятся вертикально вниз или в сторону от формующего инструмента на время раздувания заготовки, охлаждения и удаления готового изделия. В это время непрерывно работающий экструдер выдает очередную заготовку. Для обеспечения непрерывной работы этих агрегатов необходимо таким образом подобрать экструдер и формуемое изделие, чтобы в процессе работы обеспечивалось равенство времен выдачи заготовки экструдером и раздувания и охлаждения изделия в приемном устройстве 3.

В крупносерийном производстве раздувных объемных изделий небольших размеров часто используются двухпозиционные приемные устройства (рис. 4.83, *в*) в сочетании с экструдером 1 и двухручьевой экструзионной головкой 2, снабженной трехходовым пробковым краном для переключения потока расплава из одного ручья в другой.

В таких агрегатах формы 3 приемного устройства работают поочередно: когда одна форма закрыта и в ней происходит раздувание заготовки и охлаждение изделия, другая остается открытой, и поток расплава переключается для выдавливания

заготовки именно в эту форму. При использовании в раздувных агрегатах двухпозиционных приемных устройств генератор расплава работает непрерывно, в результате чего обеспечивается высокая производительность оборудования, но здесь, как и в предыдущем случае, необходимо соблюдать равенство времени выдачи заготовки и времени раздувания и охлаждения изделия.

В случае, когда время выдачи заготовки меньше времени раздувания и охлаждения изделия, а генератор расплава работает непрерывно, используют многопозиционные приемные устройства. Многопозиционные приемные устройства с периодически вращающимся столом (ротационные) целесообразно использовать в раздувных агрегатах с копильным устройством, а с непрерывно вращающимся столом (роторные) — в агрегатах с непрерывно работающим экструдером. Число одновременно устанавливаемых раздувных форм приемного устройства равно отношению времени раздувания и охлаждения изделия ко времени выдачи заготовки.

По способу смыкания полуформ приемные устройства раздувных агрегатов разделяются на механизмы с плоскопараллельным и шарнирным (книжным) смыканием форм. Предпочтительным является плоскопараллельное смыкание полуформ. Недостаток шарнирного смыкания — возможность искривления заготовки и смещения ее относительно оси головки движущимися полуформами приемного устройства.

Привод приемного устройства предназначен для перемещения полуформ во время смыкания и размыкания, для создания необходимого усилия запираания полуформ раздувной формы во время раздувания заготовки и охлаждения готового изделия. ненадежное запираание полуформ может привести к их раскрытию и разрыву изделий. По роду привода приемные устройства подразделяются на гидравлические, пневматические, гидро- и пневмомеханические.

4.5.8. Технология получения и раздувания экструзионной заготовки

Качество объемных изделий во многом зависит от параметров получения экструзионной заготовки (скорости выдачи, толщины, степени вытяжки, разбухания заготовки и т. д.), которые в свою очередь определяются конструкцией формующего инструмента и методом выравнивания в нем потока расплава.

Из практики переработки термопластов методом экструзии известно, что экструдат по выходе из формующего инструмента разбухает, т. е. размеры его поперечного сечения увеличиваются.

На изменение размеров заготовки, выходящей из формующего инструмента, влияют: остаточные напряжения в заготовке, приводящие к расширению потока расплава; поперечный градиент скорости, приводящий к ориентации макромолекул в на-

правлении потока, на выходе же из формующего инструмента происходит их разориентация. Выравнивание профиля скоростей в потоке расплава по выходе из формующего инструмента приводит к некоторому увеличению сечения заготовки независимо от относительной длины формующего инструмента. В зависимости от температуры расплава полимера и свойств перерабатываемого материала может превалировать тот или иной процесс. Разбухание заготовки и ее геометрические размеры для случая установившегося разбухания (скорость сдвига в формующем инструменте больше 20 с^{-1}) связаны следующим уравнением:

$$\beta = \sqrt{\beta_0^2 - \beta_0 \left(\frac{D_{\text{из}} - 2h}{D_{\text{из}}} \right)^2} - 0,1\beta_0 \frac{D_{\text{из}} - 2h}{D_{\text{из}}} \quad (4.150)$$

где β — коэффициент разбухания заготовки; β_0 — коэффициент разбухания круглого сплошного прутка; $D_{\text{из}}$ — наружный диаметр заготовки; h — толщина заготовки.

Заготовка по выходе из формующего инструмента, как правило, имеет весьма малую жесткость и неравномерно вытягивается под действием собственного веса, что при раздувании приводит к разнотолщинности изделий.

Вытяжку заготовок в большинстве случаев компенсируют увеличением скорости выдачи заготовки, применяя при производстве объемных изделий агрегаты с копильниками. Однако этот способ выравнивания заготовки эффективен в основном для небольших по высоте изделий (отношение высоты к диаметру около 5), так как слишком большое увеличение скорости выдачи заготовки связано с «дроблением» расплава полимера (эластическая турбулентность). Оптимальная скорость выдачи заготовки с учетом ее длины, реологических и теплофизических свойств перерабатываемого материала для данного случая может быть определена по одному из следующих уравнений:

$$v \geq \frac{1}{1-z} \frac{\gamma_t l^2}{240\eta_n} \quad (4.151)$$

$$v \geq \frac{1}{1-z} \frac{\gamma_t l^2}{80\lambda}$$

где v — скорость выдачи заготовки, м/с; l — длина заготовки, м; γ_t — плотность заготовки при температуре переработки, кг/м³; η_n и λ — соответственно ньютоновская и продольная (трубиновская) вязкость, Па·с; z — допустимая разнотолщинность заготовки, равная 0,95—0,98.

Для изделий сложной конфигурации и большой длины вытяжку заготовки можно скомпенсировать программным изменением зазора формующего инструмента. Если при выдаче заготовки из формующего инструмента считать, что процесс изотермический, инерционные силы малы по сравнению с силами тяжести, а материал заготовки несжимаемый и изотропный,

то деформацию и изменение толщины заготовки можно представить в виде следующих зависимостей:

$$\varepsilon = \exp [E(t - t_0)] \left\{ \frac{C + E - B}{K} \operatorname{sh} [K(t - t_0)] + \operatorname{ch} [K(t - t_0)] \right\} - 1 \quad (4.152)$$

$$h_t/t_0 = h_{t_0} \exp \left(-\frac{1}{2} \exp [E(t - t_0)] \left\{ \frac{C + E - B}{K} \operatorname{sh} [K(t - t_0)] + \right. \right. \\ \left. \left. + \operatorname{ch} [K(t - t_0)] \right\} + \frac{1}{2} \right) \quad (4.153)$$

где $B = \frac{\sigma_{t_0} - G}{\mu}$; $C = \frac{G t_0}{\mu}$; $E = \frac{(\mu + \lambda) G t_0 - \lambda G}{2 \lambda \mu}$; $K = \frac{1}{2 \lambda \mu} \sqrt{[(\mu + \lambda) \sigma_{t_0} - \lambda G]^2 + 4 \lambda \mu G \sigma_{t_0}}$

ε — общая деформация элемента; t_0 , t — соответственно время с момента начала экструзии до момента выхода рассматриваемого сечения и текущее время соответственно; h_t/t_0 — толщина заготовки в момент времени t ; h_{t_0} — толщина заготовки в момент времени t_0 ; σ_{t_0} — растягивающее напряжение в элементе заготовки в начальный момент времени t_0 ; λ — продольная вязкость; G и μ — константы упругого и вязкого элементов реологического уравнения трехэлементной модели Лесерсича соответственно.

Полученные уравнения (4.152) и (4.153) позволяют вычислить деформацию и геометрические размеры любого поперечного сечения заготовки, если определены моменты выхода сечения заготовки из формующего канала головки и геометрические параметры этого сечения на данный момент времени, а также известны значения реологических констант материала λ , μ и G при температуре переработки.

Уравнение (4.153), кроме того, позволяет решить и обратную задачу: по заданной толщине H_k поперечного сечения заготовки в конечный момент времени t_k , который соответствует времени его вытяжки $t_k - t_0$, определить толщину заготовки в этом сечении в момент времени t_0 . Подобный подход к решению обратной задачи позволяет перейти к нахождению закона, по которому должна изменяться высота формующего зазора экструзионной головки с целью получения заготовки с заданным распределением толщины стенки по ее высоте.

В качестве примера рассмотрим случай получения экструзионных заготовок с постоянной по высоте толщиной стенки, считая, что производительность экструдера Q_0 и средний диаметр $D_{ср}$ заготовки постоянны. Введя в уравнение (4.153) безразмерные переменные $\xi = t_0/t_k$ и $\kappa = h_{t_0}/H_k$, получим выражения для определения начальной толщины стенки заготовки в период времени t_0 по заданному ее значению в момент окончания экструзии:

$$\kappa = \exp \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{a_1 \frac{\xi}{\kappa} + b_1}{\sqrt{\left(a_1 \frac{\xi}{\kappa} - b_1 \right)^2 + c_1 \frac{\xi}{\kappa}}} \times \right. \right.$$

$$\times \operatorname{sh} \frac{(1-\xi) \sqrt{\left(a_1 \frac{\xi}{\kappa} - b_1\right)^2 + c_1 \frac{\xi}{\kappa}}}{f_1} +$$

$$\left. + \operatorname{ch} \frac{(1-\xi) \sqrt{\left(a_1 \frac{\xi}{\kappa} - b_1\right)^2 + c_1 \frac{\xi}{\kappa}}}{f_1} \right] \exp \frac{\left(a_1 \frac{\xi}{\kappa} - b_1\right)(1-\xi)}{f_1} - \frac{1}{2} \left\{ \right. \quad (4.154)$$

$$\text{где } a_1 = \frac{(\mu + \lambda) \rho_l q Q_0' \kappa}{\pi D_{\text{ср}} H_{\text{к}}}; \quad b_1 = \lambda G; \quad c_1 = \frac{4G\lambda\mu\rho_l q Q_0' \kappa}{\pi D_{\text{ср}} H_{\text{к}}}; \quad f = \frac{2\lambda\mu}{\iota_{\text{к}}}.$$

ρ_l — плотность расплава при температуре экструзии; q — ускорение силы тяжести.

Далее с учетом разбухания заготовки данные, полученные по уравнению (4.154) пересчитываются на величину формирующего зазора.

Исследования влияния технологических параметров процесса раздувного формования на свойства изделий показали, что с увеличением давления воздуха, подаваемого на раздув, и диаметра проходного отверстия в дутьевом ниппеле, предел текучести и предел прочности изделий несколько увеличиваются, а относительное удлинение уменьшается в направлении раздува. Эти же характеристики прочности практически не меняются в продольном направлении при малых коэффициентах раздувания или незначительно уменьшаются при больших коэффициентах раздувания. Различие прочностных свойств в поперечном и продольном направлении тем больше, чем больше коэффициент раздувания, что связано с эффектом ориентации в поперечном направлении. Очевидно, в каждом конкретном случае существует оптимальное сочетание основных технологических параметров, которое обеспечивает получение изделий с хорошими эксплуатационными характеристиками и высокую производительность раздувных агрегатов.

4.5.9. Испытания объемных изделий

Заполнение емкостей, полученных из термопластов методом раздувания, жидкими продуктами в нагретом состоянии распространено довольно широко. Поэтому необходимо рассматривать влияние формы емкости и свойств полимерного материала, из которого она изготовлена, на ее сопротивляемость механическим нагрузкам при повышенных температурах.

При выборе материала для производства изделий методом раздувания, предназначенных для заполнения горячим продуктом, особое внимание следует обращать на модуль упругости при изгибе, в частности, на его зависимость от температуры.

Опыты показали, что самыми подходящими по этому свойству материалами являются полиакрилаты и поливинилхлорид.

Так как емкость обычно закрывают сразу же после заполнения, материал ее должен выдерживать крутящий момент, действующий на горлышко изделия во время закрывания. Поэтому модуль упругости материала при повышенных температурах должен быть не меньше модуля упругости полиэтилена низкой плотности при комнатной температуре, так как известно, что последний успешно выдерживает такие нагрузки.

Форма раздувного изделия имеет большое значение. Плоские емкости можно заполнять более горячими продуктами, чем цилиндрические, при этом для цилиндрических изделий, склонных к сплющиванию, особенно важна равномерность их стенок.

Кроме подобных испытаний может быть рекомендован динамический метод определения прочности емкостей из жестких материалов, например, непластифицированного поливинилхлорида. Методика эксперимента основана либо на измерении высоты падения, вызывающей разрушение изделия, либо на подсчете числа падений с определенной высоты, вызывающих разрушение изделия. Порядок проведения эксперимента: емкости заполняют водой и термостатируют до температуры испытания. Испытание производят внутри вертикально установленной пластмассовой трубы, внутренний диаметр которой примерно на 2 см больше диаметра испытываемых емкостей. Для испытаний необходимо иметь комплект труб разного диаметра.

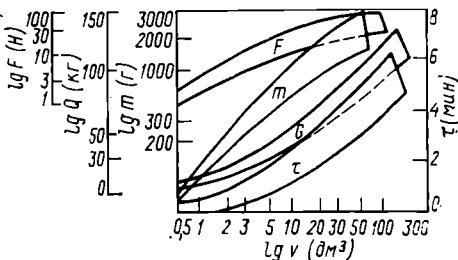
Для первой серии испытаний высоту подбирают таким образом, чтобы более 90% емкостей выдерживало падение. Для каждой последующей серии высоту падения берут на 20 см больше предыдущей. Результаты испытаний выражают в виде зависимости количества изделий, не разрушившихся после падения, (в %) от высоты падения.

Большое влияние на прочность закрытых емкостей при падении имеет степень их заполнения, что можно объяснить действием гидравлического удара, возникающего в жидкости, которая полностью заполняет емкость. При неполноте заполнения изделий энергия гидравлического удара частично превращается в работу сжатия воздуха, имеющегося в емкости: при испытании открытых емкостей степень заполнения роли не играет.

4.5.10. Методика расчета агрегата

Исходными данными для расчета служат размеры и конфигурация изделий, на основании которых определяют необходимые геометрические размеры и конфигурацию заготовки, после чего рассчитывают минимально необходимую скорость выдачи заготовки по одной из зависимостей (4.151). Выбор расчетной зависимости определяется тем, какие вязкостные характери-

Рис. 4.84. Зависимость усилия смыкания F , пластикационной производительности Q , цикла производства τ и массы изделия m от его объема V



ки известны проектировщику или технологу. Затем определяют производительность экструдера с учетом максимального разбухания заготовки.

В случае необходимости увеличивают скорость выдачи заготовки, исходя из результатов проверки, и далее переходят к профилированию, гидравлическому и прочностному расчету экструзионной головки, расчету генератора расплава и приемного устройства раздувного агрегата.

Данными для расчета приемного устройства служат размеры изделия и давление сжатого воздуха, подаваемого на раздувание заготовки. Исходя из конструктивных соображений и требований к изделию, задаются диаметром проходного сечения дутьевого ниппеля, дорна или иглы и давлением сжатого воздуха, подаваемого на раздувание заготовки.

Затем переходят к расчету усилия смыкания. Усилие смыкания полуформ приемного устройства равно увеличенному на 20% (исходя из условия нераскрытия формы и неучтенных потерь) произведению площади проекции продольного сечения раздувного изделия на давление сжатого воздуха, подаваемого на раздувание заготовки и охлаждение готового изделия. После расчета основных конструктивных параметров привода приемного устройства определяют продолжительность цикла работы раздувного агрегата и переходят к определению позиционности раздувного агрегата, силовому расчету приемного устройства и подбору вспомогательных устройств.

Для проверки некоторых полученных результатов можно воспользоваться данными, представленными на рис. 4.84.

ГЛАВА 5

Литье под давлением

Метод литья под давлением пластмасс был известен уже в конце XIX столетия, однако первые литьевые машины для термопластов появились только в 1922 г. До начала 50-х годов во всех промышленно развитых странах выпускались преимущественно машины для изготовления изделий массой не более 100—200 г; крупные машины для производства изделий массой 1,2—2 кг выпускались единичными экземплярами. Только с раз-

работкой принципа предварительной пластикации (в том числе и червячной) в 50-х годах появились машины для изготовления изделий массой 8—12 кг.

В настоящее время выпускается чрезвычайно широкая номенклатура литьевых машин для производства изделий из термопластов с массой от нескольких граммов до 30 и более кг. Наиболее распространены литьевые машины с червячной пластикацией одноцилиндровой конструкции.

В силу исторических особенностей развития литьевого метода переработки реактопластов и резиновых смесей базировалось на успехах развития переработки термопластов этим методом. Использование его в производстве резиновых технических изделий было начато в 30-х годах. Вторым рождением литьевого метода применительно к реактопластам и резиновым смесям явилось освоение червячной пластикации этих материалов на литьевом оборудовании. Начиная с этого этапа, т. е. в течение последних 25 лет, как технология метода, так и соответствующее его конструктивное оформление развиваются особенно интенсивно.

Можно выделить следующие основные направления развития метода: разработка технологических разновидностей метода, совершенствование системы управления процессами в рабочих органах литьевого оборудования, совершенствование конструкции рабочих органов оборудования, улучшение технологических свойств литьевых материалов. Преследуемые при этом цели: расширение номенклатуры материалов, перерабатываемых литьевым методом; полная автоматизация управления процессом; улучшение качества продукции; интенсификация метода. Под интенсификацией метода сейчас принято понимать не только повышение производительности оборудования (т. е. мероприятия по сокращению цикла формования), но и расширение технологических возможностей оборудования, формование изделий с большей массой и большими габаритами, а также более сложных по конфигурации изделий, уменьшение энергоемкости метода и др.

Современные типы литьевого оборудования обладают большими возможностями, т. е. способны реализовать практически все технологические разновидности метода. Более того, в рамках каждой из основных разновидностей возможны различные варианты последовательности отдельных машинных операций цикла и варианты выбора параметров режима формования. В связи с этим перед технологами в каждом конкретном случае освоения производства какого-либо изделия возникает довольно сложная многофакторная задача выбора оптимальной организации машинного цикла формования и оптимального сочетания параметров технологического режима.

В последующих двух разделах изложены основные сведения, знание которых необходимо для понимания технологических возможностей современных разновидностей литьевого метода.

Механизм движения материала в рабочих органах литевой машины, а также физико-химические процессы, обеспечивающие фиксацию конфигурации, приобретенной расплавом полимера в литевой форме, принципиально различны для термопластов, реактопластов и резиновых смесей. Несмотря на эти различия существо и последовательность отдельных операций литевого цикла формования, а также принципиальная конструкция рабочих органов и их привода в литевом оборудовании для всех этих материалов имеют много общего. В связи с этим в данном и следующем разделах изложение существа вопросов ведется параллельно для всех трех классов материалов.

Все методы формования изделий из полимерных материалов и композиций, в том числе и литье под давлением, основаны на использовании свойства этих материалов при нагревании переходить в вязкотекучее состояние.

При нагревании реактопластов и резиновых смесей одновременно с переходом в вязкотекучее состояние в материале протекает химическая реакция, сущность которой независимо от типа реакционноспособных ингредиентов резиновых смесей и реактопластов заключается в увеличении молекулярной массы основного ингредиента (смолы, каучука) с образованием трехмерной (сетчатой) молекулярной структуры. Образование такой структуры соответствует переходу материала из вязкотекучего в твердое состояние и приводит к изменению всех его свойств, в частности, вязкости, которая по истечении определенного времени (т. е. по достижении определенной степени протекания реакции) начинает интенсивно возрастать. Этот период времени, отвечающий плато вязкости, принято называть временем вязкопластического (вязкотекучего) состояния, временем «жизнеспособности», временем подвулканизации, временем скорчинга и др. Время плато вязкости в соответствии с общими закономерностями химических реакций существенно зависит от температуры материала, уменьшаясь с ее ростом. При формировании изделий в течение этого времени материалу должна быть придана требуемая конфигурация будущего изделия.

Термопласты и композиции на их основе, как правило, не содержат добавок, химическое влияние которых приводило бы к существенному изменению вязкости расплава. Однако время пребывания их в вязкотекучем состоянии и, следовательно, время, в течение которого должно быть осуществлено формование расплава, также имеет ограничение, обусловленное протекающей при повышенных температурах термодеструкцией. Период, в течение которого расплав способен пребывать при данной температуре без заметных признаков начала термодеструкции, называют термостабильностью. Эта характеристика, как и время подвулканизации, существенно зависит от температуры, интенсивно уменьшаясь с ростом последней.

Все технологические разновидности метода включают в себя следующие операции: перевод материала в вязкотекучее состояние посредством нагрева; деформирование материала с целью придания ему требуемой конфигурации в течение времени, меньшего времени плато вязкости или времени термостабильности; выдержка отформованного материала при повышенной температуре в течение времени, достаточного для практически полного протекания реакции отверждения или вулканизации (для реактопластов и резин), или выдержка отформованного материала в форме при температуре ниже температуры стеклования (кристаллизации) расплава термопласта в течение времени, достаточного для того, чтобы сообщить изделию способность сохранять приобретенную конфигурацию.

В настоящее время в промышленных масштабах получили распространение несколько технологических разновидностей литьевого метода. Различаются они, во-первых, способами пластичации материала и ввода его в форму, и, во-вторых, способами последующего формования. На рис. 5.1 показаны различные способы нагрева материала и ввода его в форму и на рис. 5.1, *a* показан один из современных вариантов первого способа пластичации, заключающегося в том, что нагреву подвергается доза материала, достаточная для проведения только одного цикла формования.

Цикл изготовления изделия состоит из следующих операций (см. рис. 5.1, *a*, поз. 1). Порция порошкообразного материала, имеющего комнатную температуру T_0 , при поднятии поршня механизма загрузки 4 сыпается в камеру нагретого до температуры T_c литьевого цилиндра 1. При движении литьевого поршня 3 вперед (поз. II) материал уплотняется, затем поршень останавливается, продолжая оказывать давление на материал. Происходит нагрев материала за счет теплопередачи через стенку цилиндра от нагревателей 2 и переход его из твердого в вязкотекучее состояние*. Под давлением вновь начинающего перемещаться поршня (до 80—140 МПа) расплав из камеры материального цилиндра через литник выдавливается в оформляющую полость формы, нагретой до температуры T_f , причем после окончательного заполнения полости небольшая часть материала 10 (до 3—7% от массы порции) остается в камере. Эту операцию называют впрыском, или заполнением формы.

Следующая операция — выдержка под давлением, в течение которой литьевой поршень продолжает оказывать на расплав в камере давление, передающееся в оформляющую полость. В течение этого времени расплав продолжает нагреваться, и вследствие нагрева в нем начинает интенсивно протекать реакция отверждения. Так как в данной технологической схеме

* Некоторые реактопласты (например, премиксы) и резиновые смеси находятся в вязкотекучем состоянии уже при температуре T_0 , так что нагрев в этом случае приводит к снижению вязкости.

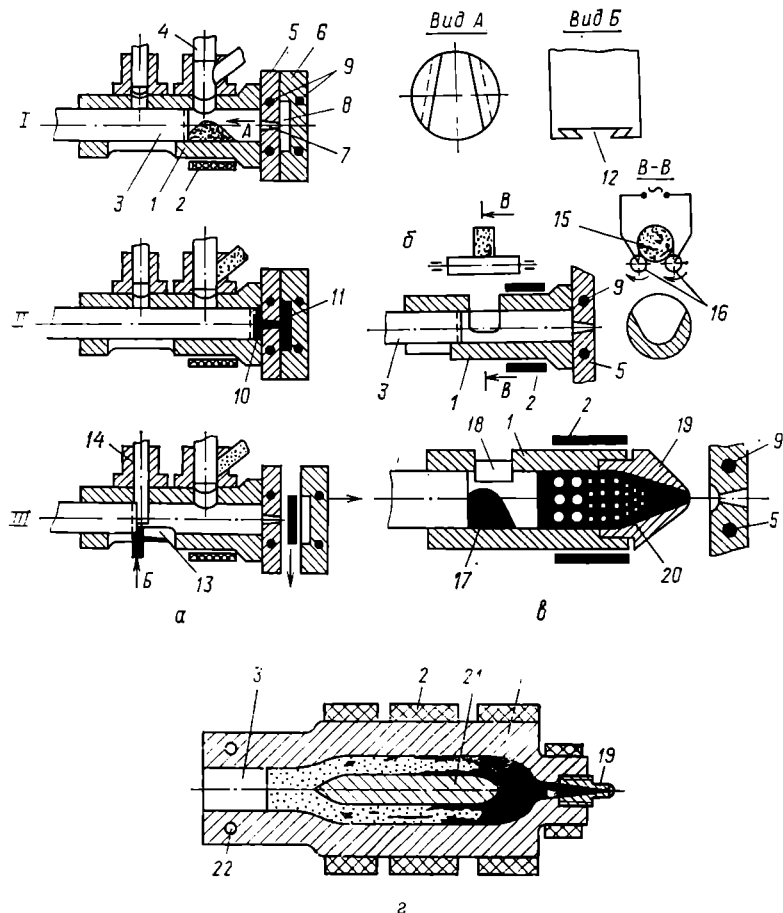


Рис. 5.1. Способы нагрева материала и ввода его в форму (а — г и I — III пояснены в тексте):

I — литевой (пластикационный) цилиндр; 2 — электронагреватель для обогрева цилиндра; 3 — литевой поршень; 4 — механизм загрузки; 5 — неподвижная полуформа; 6 — подвижная полуформа; 7 — литниковый канал; 8 — оформляющая полость формы; 9 — электронагреватель для обогрева формы; 10 — остаток материала в цилиндре после впрыска; 11 — изделие; 12 — паз типа «ласточкин хвост» для отрыва от изделия остатка с литником и транспортировки их к окну сброса; 13 — окно сброса остатка; 14 — механизм сброса остатка; 15 — таблетка реактопласта; 16 — ролики-электроды генератора ТВЧ; 17 — гранулированная резиновая смесь; 18 — загрузочное окно цилиндра; 19 — сопло; 20 — набор стальных шаров; 21 — торпеда; 22 — каналы водяного охлаждения загрузочной зоны цилиндра.

$T_{\text{ц}} \approx T_{\text{ф}}$, то скорость протекания реакции как в отформованном изделии 11, так и в остатке материала 10 практически одинакова.

По истечении времени выдержки под давлением, когда материал уже в значительной степени потерял свойство текучести, начинается следующая операция — выдержка на отверждение. При этом литевой поршень уже не оказывает давления на ма-

териал. После практического завершения реакции начинается операция извлечения изделия.

Порядок машинных действий при выполнении операции извлечения изделия существенно зависит от варианта конструктивного оформления процесса. В варианте, показанном на рис. 5.1, *а* (поз. III), литьевой поршень начинает перемещаться в исходное положение, увлекая за собой остаток отвердевшего материала с литником. В конце хода поршня остаток материала снимается с паза 12, выполненного в поршне, и удаляется через окно 13 в цилиндре механизмом сброса 14. После этого (или одновременно с этим) полуформы раскрываются, и готовое изделие выталкивается из оформляющей полости.

Подобным же образом перерабатываются резиновые смеси. Несколько отличаются только операции загрузки (так как резиновая смесь поступает на переработку не в виде порошка, а в виде монолитных заготовок требуемой массы*) и съема остатка.

С целью увеличения производительности процесса за счет исключения из цикла времени прогрева до вязкотекучего состояния материал в одном из вариантов рассмотренного способа непосредственно перед операцией загрузки в цилиндр нагревают тем или иным способом до температуры $T_{пп} < T_{\phi}$ ($T_{пп}$ — температура предварительного подогрева). При этом чем ближе $T_{пп}$ к T_{ϕ} , тем большее сокращение цикла обеспечивает эта дополнительная операция, по времени совмещенная с рассмотренными выше последовательными операциями. Для предварительного подогрева используются термошкафы, нагреватели ТВЧ и другие виды оборудования [129, с. 161—216; 130]. На ранних стадиях промышленного освоения этой схемы метода нагрев производился вне литьевой машины. Так, многие литьевые прессы для резины работают в одной технологической линии с подогревательными вальцами, с которых резиновая смесь снимается в виде отрезка ленты, свертываемой в рулон и в таком виде загружаемой затем в цилиндр прессы. Литьевые прессы фирмы «Пирелли» (Италия) и «Вернер Пфляйдерер» (ФРГ) обслуживаются экструдером, выдающим резиновую смесь в виде цилиндрических отрезков требуемой длины, также загружаемых в цилиндр прессы [131]. Аналогичные экструдеры-питатели литьевых прессов для реактопластов выпускает фирма «Триульцы» (Италия) [132, с. 22].

Относительно недавно появились литьевые машины, оснащенные устройствами для предварительного подогрева. На рис. 5.1, *б* показана принципиальная схема одного из таких устройств, обеспечивающего прогрев порции реактопласта в поле тока высокой частоты. Порция реактопласта в виде цилиндрической таблетки 15 помещается на два ролика 6, являю-

* В последние годы осваивается производство гранулированных резиновых смесей, что значительно упрощает операцию дозирования.

щихся электродами генератора ТВЧ. Одновременно с подачей напряжения ролики начинают вращаться, приводя во вращение таблетку, что обеспечивает равномерность ее прогрева. По окончании подогрева расстояние между роликами увеличивается, и таблетка падает в загрузочное отверстие цилиндра 1.

Известны конструкции машин для литья резин фирмы «Зайдль» (ФРГ), в которых цилиндр оснащен двухпозиционным устройством револьверного типа для нагрева цилиндрических заготовок за счет контакта с горячими стенками цилиндрических камер. В то время как в одной из позиций идет нагрев заложенной в нее заготовки, вторая позиция установлена соосно с цилиндром, и литьевой поршень перемещает уже нагретую заготовку в цилиндр с последующим впрыском в форму. После окончания цикла позиции меняются местами.

Предварительный подогрев материала значительно улучшает условия формования изделия вследствие снижения вязкости материала. При этом понижается требуемое давление в камере на стадии впрыска и обеспечивается лучшая воспроизводимость контуров и фактуры поверхности изделий сложной конфигурации.

Отвержденный (вулканизованный) в камере цилиндра остаток составляет потерю материала, неизбежную при данном способе и часто необратимую.

В описанном ниже способе (рис. 5.1, в) остаток материала не извлекается из цилиндра, как это делается при способе 5.1, б, а продавливается в литьевую форму в следующем цикле вместе с новой, поданной в цилиндр порцией. В этом случае $T_{пп}$ и $T_{ц}$ должны быть существенно ниже $T_{ф}$, чтобы остаток от порции предшествующего цикла сохранял текучесть вплоть до завершения операции впрыска в последующем цикле. Требование значительного различия между $T_{ц}$ и $T_{ф}$ обуславливает необходимость надежной теплоизоляции цилиндра от формы во избежание преждевременного отверждения остатка в камере цилиндра. Необходимая разность между $T_{ц}$ и $T_{ф}$ обеспечивается тем, что цилиндр и одна из полуформ контактируют только во время операций впрыска и выдержки под давлением. Благодаря этому появляется возможность создания многопозиционных машин. В этом случае один цилиндр обслуживает несколько форм и не простаивает во время операций выдержки на отверждение, раскрытия форм, извлечения изделия, чистки и смыкания форм.

При способе пластикации, показанном на рис. 5.1, б, объем материала, находящегося в цилиндре, превышает объем отливки только на незначительную величину остатка. В соответствии с этим максимальная продолжительность пребывания материала в цилиндре (продолжительность пребывания остатка) практически равна продолжительности цикла изготовления изделия. Предварительный подогрев материала осуществляется вне цилиндра.

Для двух рассмотренных ниже способов характерно то, что материал нагревается перед впрыском в форме непосредственно в цилиндре за время, гораздо большее, чем время одного цикла. В соответствии с этим объем материала, находящегося в цилиндре, в 3—5 раз превышает объем отливаемого изделия. Вместе с тем $T_{пп}$, (и, следовательно, T_c) должна быть несколько ниже, чем в предыдущих способах, т. е. такой, чтобы время плавления вязкости материала было больше, чем суммарное время трех — пяти циклов.

Один из конструктивных вариантов нагревательного цилиндра машин, работающих по этому способу, применительно к резиновым смесям показан на рис. 5.1, в. Во время впрыска порция резиновой смеси в виде гранулята подается поршнем 3 в переднюю обогреваемую часть камеры, свободный объем которой (пространство между металлическими шариками) равен двум-трем объемам отливки. Эта порция вытесняет часть уже имеющейся там и прогретой до T_c резиновой смеси в литьевую форму. Введение в камеру металлических шаров, обогреваемых за счет контакта с цилиндром, уменьшает время прогрева смеси. Такой способ нагрева (пластикация) получил название поршневого.

Подобный же по принципу нагрева способ применяется и при пластикации термопластов. Однако в этом случае процесс прогрева интенсифицируется вводом в полость не шаров, а цилиндрического тела торпеды 21 (см. рис. 5.1, г), поверхность теплообмена которой может быть дополнительно развита выполненными в ней цилиндрическими продольными отверстиями относительно малого диаметра.

Способ пластикации и ввода материала в форму, показанный на рис. 5.2, получил наибольшее распространение и является общим для всех трех классов полимерных материалов. Перерабатываемый материал в виде шнура или ленты резиновой смеси (или в виде порошка реактопласта в бункере 9) захватывается червяком 7 через загрузочное отверстие пластикационного цилиндра 8 и транспортируется в его переднюю часть. При этом материал нагревается до температуры 383—413 К как вследствие работы деформирования в канале червяка, так и за счет подвода тепла от стенок пластикационного цилиндра. Подготовленный червяком расплав тем или иным способом (в зависимости от технологической разновидности метода) подается в оформляющую полость формы 5, нагретой до температуры 180—250 °С. Вследствие дальнейшего прогрева материала за счет контакта со стенками формы в нем начинает протекать реакция вулканизации (отверждения). Во избежание выделения растворенных в материале (или выделяющихся в процессе реакции) летучих и, таким образом, устранения пористости сформованных изделий в форме в течение некоторого времени, составляющего определенную долю времени вулканизации, необходимо извне поддерживать давление. Это давление поддер-

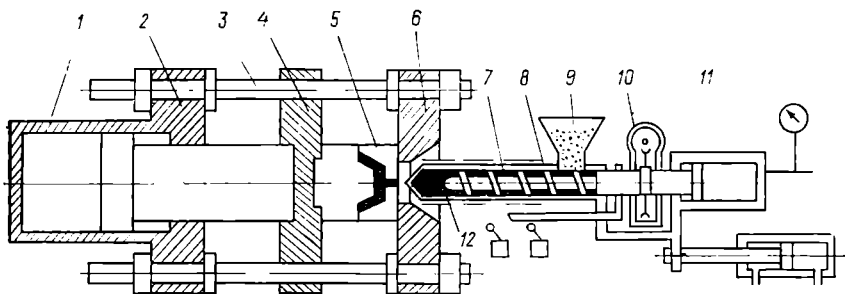


Рис. 5.2. Способ червячной пластикации материала:

1 — гидроцилиндр сжатия формы; 2 — неподвижная плита; 3 — колонны узла сжатия; 4 — подвижная плита; 5 — литейная форма; 6 — неподвижная плита; 7 — червяк; 8 — пластикационный цилиндр; 9 — бункер; 10 — привод червяка во вращение; 11 — гидроцилиндр осевого перемещения червяка; 12 — доза расплава.

живается червяком 7, находящимся под воздействием осевого усилия от гидроцилиндра 11. По истечении времени вулканизации готовое изделие извлекается из формы.

При переработке термопластов температурный режим цилиндра и формы принципиально иной. Температура подготовленного к впрыску расплава лежит в интервале 433—623 К в зависимости от типа термопласта. Температура литейной формы, как правило, выбирается на 30—100 К ниже температуры стеклования (кристаллизации) термопласта. Сущность процессов, протекающих в форме, также принципиально отличается от сущности этих процессов для реактопластов и резин. Как во время, так и после заполнения формы вследствие контакта со стенкой формы расплав интенсивно охлаждается, уменьшаясь в объеме. Во избежание возможного при этом образования утяжин на поверхности изделия и усадочных раковин червяк в течение некоторого времени продолжает оставаться в переднем положении, оказывая давление на расплав. Это давление поддерживается до тех пор, пока расплав в литнике или оформляющей полости формы вследствие охлаждения практически полностью не потеряет свойство текучести. После этого изделие выдерживается в форме в течение некоторого времени, достаточного для того, чтобы продолжающий охлаждаться материал изделия приобрел требуемую жесткость.

Характер и последовательность машинных операций цикла, реализующих эти процессы, существенно зависят от применяемого способа формования.

5.2. СПОСОБЫ ФОРМОВАНИЯ

5.2.1. Литье под давлением

Под термином «литье под давлением» в настоящее время понимают как литеевое формование вообще, так и тот основной его способ, от которого он получил свое развитие. Ниже рас-

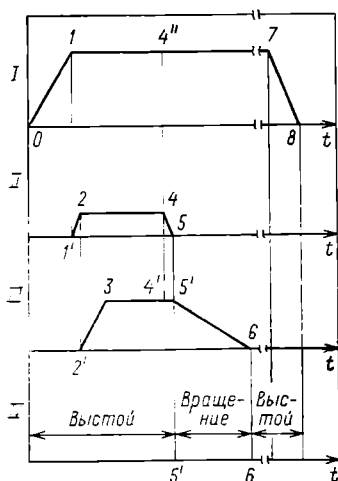


Рис. 5.3. Циклограмма работы машины при литье под давлением:

I — процессы, протекающие в форме; II — работа узла пластикации и впрыска; III — осевое перемещение червяка; IV — вращение червяка.
 $0-1$ — смыкание формы; $1'-2$ — подвод узла впрыска; $2'-3$ — впрыск; $3-4'$ — выдержка под давлением; $4-5$ — отвод узла впрыска; $4''-7$ — выдержка на отверждение; $7-8$ — раскрытие формы; $5'-6$ — вращение и осевое смещение червяка. Исходное положение червяка — заднее (отведен от сопловой части цилиндра); исходное положение формы — раскрытое.

смотрены основные этапы цикла литевого формования, последовательность машинных операций цикла и взаимосвязь между регулируемые машинными параметрами цикла и технологическими параметрами процесса формования на каждом этапе.

Циклограмма работы машины при традиционной разновидности режима литья под давлением показана на рис. 5.3. Цикл начинается смыканием формы (участок $0-1$ циклограммы) посредством подачи рабочей жидкости в гидроцилиндр I (см. рис. 5.2) привода подвижной плиты 4 узла смыкания, состоящего также из двух неподвижных плит 2 и 6 и колонн 3. Вслед за этим осуществляется перемещение узла впрыска до прижатия пластикационного цилиндра к литевой форме (участок $1'-2$) и впрыск подготовленной и находящейся перед червяком дозы расплава (участок $2'-3$).

В течение отрезка времени $3-4'$ червяк продолжает оказывать давление на расплав, осуществляя машинную операцию выдержки под давлением. Затем узел впрыска отводится в исходное положение (участок $4-5$), и червяк, не обслуживая более форму, начинает вращение, пластицируя материал, накапливая расплав перед собой и смещаясь при этом в осевом направлении до позиции, которой соответствует требуемая масса накопленной дозы (участок $5'-6$).

При пластикации относительно невысокое давление в гидроцилиндре II препятствует осевому смещению червяка, создавая в накапливаемой дозе давление, обеспечивающее ее монолитность. Пластикация протекает параллельно с выдержкой в форме на охлаждение (для термопластов) или на вулканизацию или отверждение (для резиновых смесей или реактопластов). По окончании выдержки на отверждение форма раскрывается (участок $7-8$) и готовое изделие извлекается из нее. Время этой выдержки (отрезок $4''-7$), как правило, одного порядка с временем набора дозы ($5'-6$) для термопластов и значительно меньше последнего для реактопластов и резин.

Прогрессивные конструкции литевых машин позволяют осуществлять операцию пластикации в любом участке временного диапазона ($5-7$), причем в отдельных конструкциях оказывает-

ся возможным начинать пластикацию таким образом, чтобы конец ее (точка б) совпадал по времени с началом впрыска в форму (точка 2') в последующем цикле [133]. Такая организация машинного цикла дает возможность свести время пребывания дозы расплава в цилиндре перед впрыском к минимуму.

Как отмечалось, растворенные в реактопластах летучие, а также образующиеся в процессе пластикации газообразные продукты реакции стремятся выделиться из материала в свободную фазу, что может приводить к пористости изделий. Для удаления этих летучих из материала в циклограмме некоторых машин предусматривается на промежуточных стадиях операции впрыска временное (на 0,5—2 с) прекращение осевого перемещения червяка с одновременным частичным раскрытием (на 1,5—3 мм) полуформ.

Технологическими параметрами процесса пластикации для рассмотренного способа являются масса накопленной дозы, время набора дозы, температура материала дозы и степень протекания реакции в нем (если процесс пластикации организован таким образом, что в начале червяка идет реакция). Ни один из этих параметров процесса при современном конструктивном оформлении не может регулироваться непосредственно. Требуемое значение каждого из этих параметров может быть достигнуто путем установки определенных значений непосредственно регулируемых машинных параметров цикла. Машинными параметрами в данном случае являются: частота вращения червяка, давление в гидроцилиндре, осевое смещение червяка, температура пластикационного цилиндра (точнее, распределение температуры цилиндра по его длине).

Как правило, каждый технологический параметр в большей или меньшей степени зависит сразу от нескольких машинных параметров, причем от некоторых из них зависят и другие параметры. Например, температура расплава в дозе зависит не только от температуры цилиндра, но и от частоты вращения и давления перед червяком. Масса дозы в наибольшей степени зависит от осевого смещения червяка, но также чувствительна к изменению указанных выше параметров.

Таким образом, очевидно, что независимое управление каждым из технологических параметров практически невозможно. Сложная задача достижения требуемых значений технологических параметров в рамках даже одной только машинной операции, не говоря уже о совокупности технологических параметров всего цикла, может быть решена при условии глубокого понимания процессов, протекающих в рабочих органах и определяющих многофакторные взаимосвязи между машинными и технологическими параметрами. Это оказывается необходимым в том случае, когда формование ведется в экстремальных условиях, т. е. в таких условиях, когда с целью интенсификации процесса (повышение производительности, увеличение массы изделия и др.) совокупность машинных параметров, выбирается такой,

что один или несколько технологических параметров или параметров состояния материала оказываются по своим значениям близкими к номинальным (например, если объем отливки близок к номинальному объему впрыска или площадь отливки такова, что распорное усилие от давления расплава в литейной форме близко к номинальному усилию смыкания формы и т. п.).

Основными технологическими параметрами операции впрыска в форму являются: температура расплава на входе в форму, скорость заполнения формы и время полного заполнения формы. Степень завершенности заполнения в каждый момент времени можно характеризовать отношением объема впрыснутого расплава к объему оформляющей полости. Эти параметры процесса сильно зависят от конфигурации формируемого изделия, размеров и формы литникового канала.

Изменение этих параметров возможно путем варьирования непосредственно регулируемых параметров: температуры формы, давления в гидроцилиндре впрыска и скорости осевого перемещения червяка (последние два параметра, строго говоря, нельзя считать независимо регулируемыми). В экстремальных условиях проведения операции впрыска (в частности, при заполнении оформляющих полостей сложной конфигурации резиновыми смесями, когда к моменту конца заполнения плато вязкости оказывается практически исчерпанным) скорость впрыска, влияющую только лишь на начальный, очень малый по времени этап заполнения, можно считать очень слабым параметром с точки зрения влияния на группу технологических параметров.

Технологические параметры операции выдержки под давлением — давление в форме и время выдержки под давлением. Второй параметр поддается непосредственному регулированию и поэтому является одновременно машинным регулируемым параметром. Другой машинный параметр, оказывающий влияние на давление в форме, — давление в гидроцилиндре; соответствующее ему давление расплава в цилиндре перед червяком называют давлением подпитки (давлением дожатия). В ряде конструкций эта операция может быть организована таким образом, чтобы давление подпитки по истечении определенных отрезков времени изменялось ступенчато на любую заданную величину.

Основное назначение выдержки на отверждение для реактопластов и резин — обеспечить требуемую и по возможности постоянную по всему объему степень вулканизации (отверждения). К моменту начала этой операции вязкость материала в литниковой системе, как правило, значительно увеличивается, поэтому влияние извне на характер протекающих в форме процессов оказывается практически невозможным. Единственным регулируемым машинным параметром этой операции является время выдержки на отверждение, оказывающее влияние на степень завершенности процесса отверждения.

Выдержка на охлаждение при литье термопластов начинает-

ся с момента, когда основная масса материала в литниковом канале (или в оформляющей полости литьевой формы) охлаждалась до температуры, близкой к температуре стеклования (кристаллизации), и поэтому практически потеряла свойство текучести. В этом случае так же исключается возможность воздействия извне на процесс дальнейшего охлаждения и усадки материала в форме, и время выдержки на охлаждение является единственным независимо регулируемым машинным параметром, от которого зависит степень охлаждения отформованного изделия к моменту извлечения его из литьевой формы.

5.2.2. Интрузия

Основные отличия этого способа формования от литья под давлением заключаются в проведении операций пластикации и впрыска, которые в данном случае совмещены во времени, а заполнение основной доли объема оформляющей полости осуществляется вращающимся и неподвижным в осевом направлении червяком. Основным преимуществом интрузионного формования перед литьем под давлением является возможность формования изделий, масса которых во много раз больше максимальной дозы, которую способен накопить червяк в пластикационном цилиндре. Этот способ в свою очередь имеет несколько вариантов. Циклограмма наиболее распространенного варианта показана на рис. 5.4, а [134, 135]. После смыкания формы (участок 0—1) и подвода узла впрыска (1'—2) червяк, пребывая в крайнем переднем положении, начинает вращаться (точка 2') и нагнетать расплав в оформляющую полость формы. По мере заполнения формы ее гидравлическое сопротивление и, следовательно, давление расплава перед червяком возрастают. По достижении определенного давления перед червяком и соответствующего ему заданного давления в гидроцилиндре

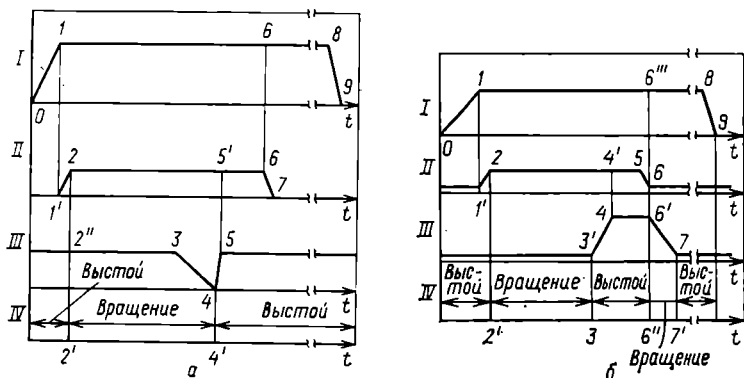


Рис. 5.4. Варианты циклограмм интрузионного формования (обозначения I—IV см. на рис. 5.3). Исходное положение формы — раскрытое. Исходные положения червяка — крайнее переднее (а) и крайнее заднее (б).

последнее в дальнейшем остается постоянным, а червяк, продолжая вращаться, начинает смещаться в осевом направлении (точка 3) на заданную величину (участок 3—4). В течение этого времени только часть подаваемого червяком расплава продолжает поступать в форму, остальная часть формируется в виде дозы расплава перед червяком. По достижении червяком заданной позиции 4 в гидроцилиндр подается жидкость, и червяк, прекратив вращение, впрыскивает подготовленную дозу в форму (участок 4—5), завершая ее заполнение. Далее следуют операции выдержки под давлением (5'—6), отвода узла впрыска (6—7), выдержки на отверждение (6'—8) и размыкания формы (8—9).

Технологическими параметрами операции заполнения формы являются: температура расплава на входе в форму; время заполнения формы вращающимся и отходящим назад червяком; степень заполнения формы к моменту 4 (рис. 5.4, а); время впрыска осевым смещением червяка вперед. Воздействие на эти параметры может осуществляться следующими регулируемые машинными параметрами соответственно: частотой вращения червяка и температурой стенок цилиндра; частотой вращения червяка; также частотой вращения червяка; скоростью впрыска или давлением в гидроцилиндре в течение периода 4—5*. Вследствие совмещенности во времени операций заполнения формы и пластикации первые три из перечисленных технологических параметров являются для них общими. Масса накопленной перед червяком дозы варьируется осевым смещением червяка.

В данном варианте (как и в последующих) при впрыске в форму (период 4—5) червяк может продолжать вращение. Вследствие совмещенности указанных операций управление технологическими параметрами во всех вариантах интрузионного способа более сложно, чем при литье под давлением.

Циклограмма второго варианта [136] способа интрузии показана на рис. 5.4, б. Операции смыкания формы (0—1) и подвода узла впрыска (1'—2) осуществляются как и в предыдущем варианте. Червяк в начале цикла находится в крайнем заднем положении с накопленной перед ним максимально возможной по массе дозой. Сразу после операции подвода червяк начинает вращаться (точка 2') нагнетая расплав, который продавливается в литьевую форму. По истечении заданного отрезка времени (2'—3) червяк прекращает вращение и создаваемым в гидроцилиндре впрыска давлением начинает осевое движение вперед, впрыскивая имеющуюся перед ним дозу расплава в форму (участок 3'—4). По истечении выдержки под давлением (4'—5) и отвода узла впрыска (5—6) червяк приводится во вращение для набора дозы для следующего цикла (участок

* Как уже отмечалось, при впрыске эти два параметра невозможно регулировать независимо один от другого на протяжении всей этой операции.

6'—7). При этом в гидроцилиндре впрыска поддерживается минимально необходимое давление, обеспечивающее монолитность накапливаемой дозы, однако не столь высокое, чтобы расплав дозы через сопло вытекал из цилиндра.

Продолжительность выдержки на вулканизацию (6'''—8), как правило, значительно больше продолжительности набора дозы (6'—7), поэтому последняя операция может быть осуществлена в любом интервале периода (6'''—8). В ряде случаев операция набора дозы может быть осуществлена не в предшествующем, а в текущем цикле — либо перед смыканием формы (0—1), либо перед подводом (1'—2), либо после подвода узла впрыска, начиная с точки 2, и, таким образом, непосредственно предшествуя или совмещаясь с заполнением формы вращающимся червяком без прекращения вращения последнего.

При переработке термопластов и резиновых смесей с малой вязкостью избежать вытекания во время набора дозы при разобщенных сопле и форме трудно, если сопло не оснащено запорным устройством. В этом случае, если по условиям формования изделия давление в цилиндре на выдержке под давлением может быть по величине близким к давлению в течение набора дозы, последнюю операцию (6'—7) можно совмещать во времени с операцией выдержки под давлением (4'—5). При этом оказывается желательным не прекращать вращения червяка и во время впрыска, чтобы избежать его повторного пуска на вращение.

Технологические параметры операций заполнения и пластикации для второго варианта (в соответствии с циклограммой на рис. 5.4, б) практически те же, что и для первого варианта (см. с. 256), однако набор машинных параметров, воздействующих на них, несколько иной. Так, параметр «температура расплава на входе в форму» управляется теми же машинными параметрами, а параметр «время вращения червяка (2'—3)» в данном случае регулируется непосредственно, т. е. является одновременно и машинным параметром. Третий параметр управляется частотой и временем вращения червяка, а четвертый — так же, как и в первом варианте. Операция пластикации здесь выполняется в два приема (участки 2'—3, 6''—7'').

Третий вариант интрузионного формования, разработанный относительно недавно [137], является по существу улучшением первого варианта, позволяющим расширить сферу его применения. Циклограмма его подобна показанной на рис. 5.4, а. Отличие состоит в том, что давление в гидроцилиндре, которому соответствует начало отхода червяка (точка 3), является регулируемым машинным параметром, а осевое смещение (3—4) не регулируется и имеет максимальное значение, соответствующее данному типу машины.

В соответствии с этим взаимосвязи между технологическими и машинными параметрами несколько иные. Например, в данном варианте появляется возможность управлять не только об-

щим временем заполнения формы вращающимся червяком (период $2'—4'$), но и отдельными стадиями этого периода ($2''—3$ —вращение без перемещения и $3—4$ —вращение с отходом червяка назад). Так, время заполнения ($2''—3$) и степень заполненности формы в точке 3 могут регулироваться частотой вращения червяка и давлением в гидроцилиндре в течение периода ($3—4$); количество поданного за этот период в форму расплава — этими же машинными параметрами, значения которых могут быть отличными от их значений в течение периода ($2''—3$).

5.2.3. Литьевое прессование

В настоящее время под термином «литьевое прессование» понимают две технологические разновидности этого способа, имеющие принципиальные различия.

Первая разновидность была реализована в промышленных масштабах задолго до того, как литье под давлением выделилось в самостоятельный метод переработки пластмасс [138]. Этот вариант литьевого прессования использовался и используется сейчас для переработки резиновых смесей и реактопластов. По существу и последовательности отдельных операций он подобен способу литья под давлением, а конструктивное оформление близко к схеме, показанной на рис. 5.1, *а*. В связи с этим здесь не рассматриваются циклограмма и взаимосвязи технологических и машинных параметров цикла. Принципиальным отличием является то, что цилиндр 1 и литевой поршень 3 не принадлежат машине, а являются неотъемлемой частью литевой формы.

На ранней стадии развития литьевое прессование осуществлялось на прессах с использованием плунжерных форм. Типичная плунжерная форма (рис. 5.5) включает в себя литьевое устройство (литьевую камеру 2 и литевой плунжер 1), литниковую систему 3 (в простейшем случае один литниковый канал) и оформляющую полость 4 , ограниченную двумя или большим числом формирующих элементов. При работе с такими формами оператор вручную закладывает навеску перерабатываемого материала в камеру 2 формы, заранее прогретой до температуры вулканизации (отверждения), закрывает литьевую форму также прогретым плунжером 1 и далее всю собранную таким образом форму устанавливает на плиту вулканизационного пресса. При закрывании пресса плунжер выдавливает материал из литевой камеры через литниковую систему в оформляющую полость, где в ходе дальнейшей выдержки под давлением материал вулканизуется (отверждается). Из приведенного описания очевидно, что функции оператора практически ничем не отличаются от тех, которые им выполняются при работе с обычными компрессионными формами по методу прямого прессования, однако условия переработки материала имеют сущест-

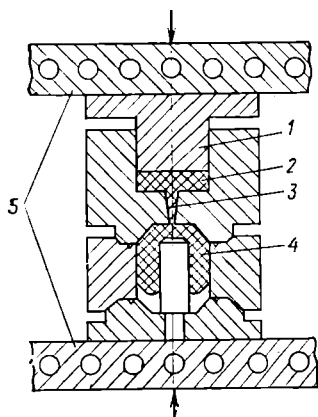


Рис. 5.5. Схема съемной плунжерной формы:

1 — литьевой плунжер; 2 — литьевая камера; 3 — литниковая система; 4 — оформляющая полость; 5 — нагревательные плиты вулканизационного пресса.

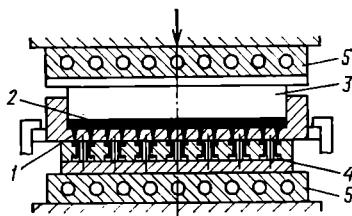


Рис. 5.6. Схема многогнездной формы:

1 — литниковый впуск; 2 — литьевая камера; 3 — литьевой плунжер; 4 — оформляющая полость; 5 — нагревательные плиты пресса.

венные отличия, основным из которых является значительно большая величина и скорость деформации материала, главным образом в литниковой системе плунжерной формы. В этом смысле процесс переработки материала по способу литьевого прессования полностью соответствует литью под давлением.

Особенностью литьевого прессования являются переменные в ходе заполнения оформляющей полости формы объем и сопротивление литниковой системы, включающей и литьевую камеру. Действительно, торец литьевого плунжера и донная часть литьевой камеры образуют зазор, величина которого в ходе процесса заполнения переменна. Особенно на заключительных стадиях заполнения оформляющей полости этот зазор представляет собой дополнительное сопротивление течению материала. Это обстоятельство наряду с необходимостью создания в оформляющей полости давления на период вулканизации вынуждает закладывать в литьевую камеру навески материала с избытком по сравнению с объемом оформляющей полости, что влечет за собой повышенный расход материала, так как избыток материала в литьевой камере вулканизуется и представляет собой невозвратный отход.

В современном варианте литьевого прессования сохранены его основные принципы, однако конструктивное оформление процесса подверглось существенным изменениям. Прежде всего форму закрепляют на нагревательных плитах пресса и конструируют ее многогнездной. Применение таких форм потребовало изменения конструкции пресса. Современные прессы для литьевого прессования выполняются одноэтажными со значительным ходом при раскрытии пресса (до 700 мм), причем отдельно раскрываются элементы оформляющей полости формы

и плунжерное литьевое устройство. Пресс оснащается устройствами, облегчающими извлечение изделий. На рис. 5.6 представлена схема многогнездной литьевой формы, закрепленной на нагревательных плитах прессы. Такие формы широко используются при производстве мелких формовых деталей из резиновых смесей типа тормозных манжет, втулок, колец и т. п. Число гнезд в форме при таком способе изготовления может достигать 500, а иногда и более.

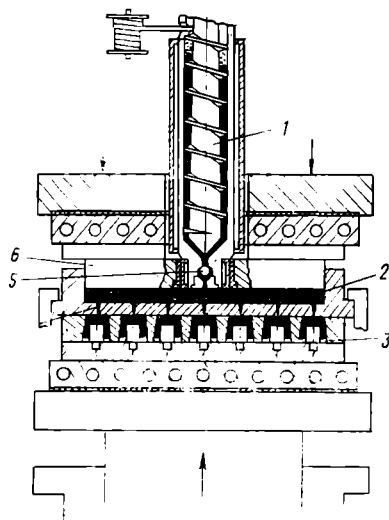
Недостатком литьевого прессования, существенно снижающим его экономическую эффективность, является неизбежность получения значительных вулканизационных отходов. Эти отходы в ряде случаев достигают 300% от массы производимых за один цикл деталей. Средняя цифра составляет 40%. В основном эти отходы объясняются вулканизацией неизбежных излишков материала в литьевой камере формы. В поисках путей ликвидации этого недостатка литьевого прессования ряд фирм [139, 140] предлагает прием, позволяющий исключить вулканизацию материала в литьевой камере формы. Этот прием заключается в термостатировании материала в литьевой камере и изоляции ее от формы, нагреваемой до высоких температур. Такие системы для переработки резиновых смесей разработаны фирмами «РЕП», «Цинциннатти — Сакомат» (Франция) и другими. При использовании таких систем отмечается сокращение вулканизационных отходов в 6—20 раз при одновременном повышении стоимости формы в 1,5—2 раза. Итоговая эффективность способа остается положительной, особенно при крупносерийном производстве. Такие системы могут использоваться не только применительно к способу литьевого прессования, но и вообще при литьевом методе переработки резиновых смесей и реактопластов.

Навеска может загружаться в камеру в холодном состоянии (при комнатной температуре) или предварительно нагреваться до температур, обычно не превышающих 373 К. Механизация процесса загрузки необходимого количества материала в литьевую камеру формы при одновременной пластикации и нагреве его до температур 393—413 К возможна при использовании червячного пластикатора 1 (рис. 5.7), нагнетающего материал в литьевую камеру 2. При этом давление нагнетания и степень разогрева материала регулируются изменением величины усилия на литьевом плунжере 6. Это усилие выбирается таким образом, чтобы материал не нагнетался в оформляющие полости 3 формы через литниковые впуски 4, а только равномерно заполнял литьевую камеру с заданной степенью разогрева. Заполнение оформляющих полостей формы осуществляется опусканием плунжера 6. При этом в литьевой камере 2 развивается давление литья, и материал через литниковые впуски 4 поступает в оформляющие полости. Во избежание перетекания материала в винтовой канал червячного пластикатора его головка оснащена клапаном 5.

Рис. 5.7. Схема литьевого формования с использованием механизированной загрузки литьевой камеры:

1 — червячный пластикатор; 2 — литьевая камера; 3 — оформляющая полость; 4 — литниковый впуск; 5 — клапан; 6 — литьевой плунжер.

Достоинством этого варианта литьевого прессования в сравнении с традиционной разновидностью литья под давлением является отсутствие ограничений по объему перерабатываемого за один цикл материала. Действительно, при прямом впрыске материала с использованием плунжерной или червяк-плунжерной литьевой машины максимальный объем отливки, если не использовать интрузионный способ, определяется диаметром и ходом литьевого плунжера (или червяк-плунжера). Для литьевого прессования в настоящем варианте не существует этого ограничения, и объем отливки определяется по существу объемом изделий, производимых в каждой конкретной форме, снабженной литьевой камерой необходимого объема.



Вторая разновидность литьевого прессования включает в себе как элементы традиционного способа литья под давлением, так и метода прямого прессования. Эта разновидность получила сейчас преимущественное распространение при переработке резиновых смесей и в меньшей степени — реактопластов. Применение ее при переработке термопластов ограничено узким кругом особотолстостенных и особотонкостенных изделий.

Рис. 5.8 иллюстрирует этот процесс. Как видно из рис. 5.8, а, оформляющая полость литьевой формы в течение периода заполнения методом литья под давлением находится в неполностью замкнутом состоянии. Таким образом, первоначально в приоткрытой форме формуется заготовка, близкая по конфигурации и размерам к производимому изделию. Последующая операция — прессование осуществляется при замыкании формы с необходимым усилием (рис. 5.8, б). При этом изделие окончательно формуется и далее отверждается. Этот процесс особенно целесообразно использовать при переработке материалов, сложных для литья под давлением (например, материалов с повышенной вязкостью, низкой термостабильностью, склонных к подвулканизации), или при изготовлении деталей сложной конфигурации с большим сопротивлением течению материала при заполнении. В работе [141] при переработке фторэластомеров рекомендуется заполнять форму, раскрытую на 1,5 мм. По окончании впрыска форма закрывается при полном давлении в

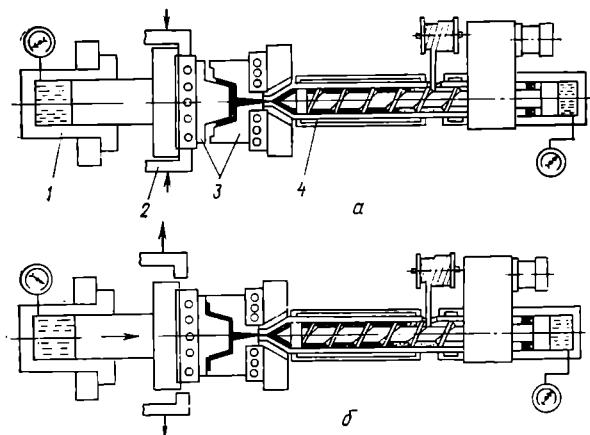


Рис. 5.8. Схема процесса литьевого прессования:

а — этап заполнения формы литьем под давлением; *б* — этап прессования; 1 — узел за-пира-ния формы; 2 — ограничитель хода подвижной плиты пресса; 3 — литьевая форма; 4 — узел пластикации и впрыска.

гидроцилиндре запира-ния. При этом производится окончательное формование с образованием тонкого слоя (грата) между поверхностями разъема формы. Очевидно, что при заполнении неполностью замкнутой формы сопротивление течению может быть существенно меньшим, поэтому представляется возможным для высоковязких материалов производить заполнение при сравнительно низких давлениях с большими скоростями.

Последующему окончательному формованию деталей прессованием полученных заготовок сопутствуют достаточно малые деформации материала (по сравнению с литьем под давлением) при незначительных скоростях деформации. Данное обстоятельство определяет возможность получения изделий более высокого качества, поскольку релаксация напряжений, которые могут при сшивании фиксироваться в изделии, осуществляется с более низкого уровня напряженного состояния материала. Для материалов, склонных к подвулканизации, возможно сокращение времени впрыска, и, следовательно, уменьшение опасности преждевременного структурирования, что обычно сопровождается неполным оформлением изделий (недолив)

Данный вариант литьевого прессования открывает еще одну возможность совершенствования литьевого процесса и его интенсификации. Заполнение приоткрытой формы через центральный литниковый канал позволяет в ряде случаев полностью отказаться от разводящих литниковых каналов в многогнездных литьевых формах. На рис. 5.9 представлена схема так называемой «безлитниковой» формы. Роль разводящих литниковых каналов, обеспечивающих заполнение оформляющих полостей 2 литьевой формы 1, выполняет промежуток между полуформами, разомкнутыми на период впрыска на заданную величину

зазора k . Последующее запирание формы обеспечивает затекание материала в оформляющие полости, причем в том случае, если форма выполнена с «режущими кромками», при заперении изделие отсекается от облоя и, таким образом, практически не требует окончательной обработки.

В показанном на рис. 5.8 и описанном выше варианте литьевое прессование применяется при переработке термопластов только для формирования особотонкостенных изделий. Заполнение формы при изготовлении таких изделий традиционным способом литья под давлением оказывается невозможным из-за преждевременной потери расплавом текучести вследствие его охлаждения в течение операции впрыска. Впрыск в частично замкнутую форму вследствие гораздо больших проходных сечений каналов оформляющей полости происходит, во-первых, быстро, во-вторых, сопровождается намного менее интенсивным теплообменом расплава с формой, что в совокупности приводит к меньшей степени охлаждения расплава в форме во время операции впрыска. Последующее окончательное заполнение оформляющей полости за счет полного смыкания полуформ происходит при равномерном приложении давления на всю площадь растекшегося в полости расплава, что также способствует сокращению времени заполнения и создает лучшие условия воспроизведения всех деталей формообразующих поверхностей оформляющей полости. Этот вариант нашел эффективное применение при производстве грампластинок литьевым методом [142].

Второй вариант впрыска в частично замкнутую форму используется при литье особотонкостенных изделий. В этом варианте, в отличие от показанного на рис. 5.8, впрыск должен осуществляться в частично замкнутую форму, однако с уже герметизированной оформляющей полостью (рис. 5.10). При впрыске заполняется весь объем оформляющей полости. Начальная стадия выдержки под давлением осуществляется подпиткой через литник традиционным способом. Время отверждения литника намного меньше времени отверждения материала в оформляющей полости вследствие толстостенности изделия; в связи с этим после отверждения литника завершающая стадия выдержки под давлением с целью компенсации усадки осуществляется за счет последующего окончательного смыкания полуформ. Очевидно, что величина зазора « k » (см. рис. 5.9, a) выбирается в этом случае из условия полного смыкания формы к моменту охлаждения сердцевины изделия до температуры стеклования [135]. При таком способе компенсации усадки деформации, имеющие место в расплаве во время выдержки под давлением, минимальны; в соответствии с этим минимальными оказываются и остаточные напряжения в материале изделия, зафиксированные его охлаждением [143].

В заключение следует отметить, что современное литьевое оборудование предоставляет технологам большие возможности

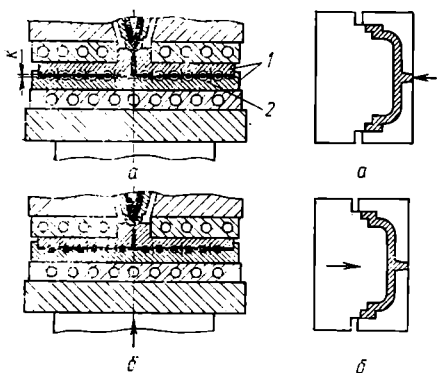


Рис. 5.9. Схема безлитниковой формы:

а — этап заполнения формы литьем под давлением (1 — литьевая форма; 2 — оформляющие полости для колец круглого сечения); б — этап прессования.

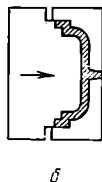


Рис. 5.10. Режим впрыска в частично замкнутую форму:

а — впрыск; б — выдержка под давлением.

выбора режимов формования для каждого конкретного случая. Вместе с тем принятие единственно правильного решения с учетом требований, выполнение которых обеспечивает интенсивное ведение процесса формования (максимальность производительности, необходимое качество продукции, возможно более полная реализация технологических возможностей оборудования и др.), является довольно сложной задачей.

5.3. ПРОЦЕСС ЧЕРВЯЧНОЙ ПЛАСТИКАЦИИ

5.3.1. Требования к дозе расплава, подготовленной к впрыску

Червячный способ пластикации благодаря своей универсальности (т. е. применимости для всех перерабатываемых литьем под давлением полимерных материалов) и наилучшему среди прочих способов качеству подготавливаемого для впрыска расплава в совокупности с возможностью реализации литьевого метода при минимальных отходах материала получил чрезвычайно широкое распространение. Практически во всех типах вновь создаваемого литьевого оборудования используется именно этот способ пластикации.

В течение операции пластикации должна быть накоплена доза расплава для последующего формования. К дозе предъявляются следующие требования: 1) максимально возможная плотность (т. е. минимально возможная пористость) материала дозы*; 2) максимально возможная точность воспроизведения массы дозы от цикла к циклу (т. е. максимально возможная точность дозирования); 3) максимально допустимая (для реактопластов и резин) или требуемая по условиям процессов, протекающих в форме, температура дозы; 4) максимально возможная однородность распределения температуры по массе дозы;

* Это требование в первую очередь относится к реактопластам и резиновым смесям с высокой вязкостью.

5) максимально или минимально возможная и одинаковая по массе дозы степень протекания той или иной реакции. Эти требования нуждаются в пояснении.

Выполнение первого требования обеспечивает достижение максимально возможной массы дозы $M_{\max}$, величина которой определяется следующим выражением:

$$M_{\max} = \frac{\pi D^2}{4} L_{\max} \rho_{\max} \quad (5.1)$$

где D — диаметр червяка; $L_{\max}$ — максимально возможный для данной машины ход червяка; $\rho_{\max}$ — максимально возможная плотность материала дозы.

Максимальность массы дозы является необходимым (однако, как известно, не достаточным) условием достижения максимально возможной массы изделий.

Выполнение второго требования (достижение максимальной точности дозирования) применительно к трем конструктивным схемам оборудования, подобным показанной на рис. 5.1, *в* или на рис. 5.11, *а*, *б*, не столь существенно по сравнению с другими требованиями по следующей причине. В схеме на рис. 5.11, *а* материал, пластицируемый червячным пластикатором, в котором вращающийся периодически червяк 4 не имеет осевого перемещения, подается в литьевую камеру (цилиндр) 1. После того как требуемая масса дозы накоплена в камере, литьевой поршень 5 впрыскивает ее через сопловую часть 3 в литьевую форму 2. В схеме на рис. 5.11, *б* червяк 1, вращаясь и перемещаясь в осевом направлении, накапливает перед собой в цилиндре дозу, свободному выходу которой из цилиндра препятствует нож-затвора 6. После набора дозы затворка поднимается, червяк, перемещаясь вперед, выдавливает дозу, а опустившаяся затем затворка отсекает ее, и доза 5 падает в загруз-

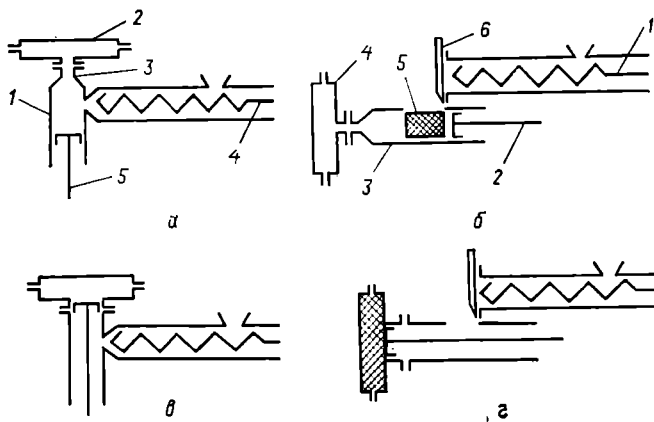


Рис. 5.11. Варианты конструктивных схем механизмов пластикации и впрыска. Пояснения в тексте.

зочное окно литьевого цилиндра 3. Литьевым поршнем 2 доза впрыскивается в форму 4.

Несмотря на некоторые принципиальные отличия схем на рис. 5.1 и 5.11, *а, б* (например, в схемах на рис. 5.11, *а, б* червяк не выполняет функций впрыскивающего поршня, в схеме на рис. 5.11, *а* червяк не имеет осевого смещения), общим является то, что остающаяся в литьевом цилиндре после впрыска в форму небольшая часть материала дозы объединяется с материалом новой дозы, накапливаемой в последующем цикле, и затем в этом цикле (возможно, частично и в дальнейших) впрыскивается в форму. Чем ниже точность дозирования (т. е. чем больше колебание массы дозы от цикла к циклу), тем большая средняя гарантированная величина этого остатка дозы должна быть обеспечена (во избежание недоливов, повышенной пористости изделий и др.) и тем соответственно больше колебание массы остатка от цикла к циклу. Эти конкретные проявления пониженной точности дозирования не вызывают повышенного расхода материала, ухудшая, правда, качество изделий (в первую очередь, стабильность размеров изделий). Однако в конструктивных схемах «в» и «г» (рис. 5.11), являющихся разновидностями вариантов «а» и «б» соответственно, повышение точности дозирования помимо улучшения качества изделий приводит к сокращению отходов материала (снижению расходного коэффициента на сырье) по следующей причине. Литьевой цилиндр постоянно контактирует с одной из полуформ, поэтому остаток материала перед поршнем оказывается практически в равных тепловых условиях с материалом в форме, отверждаясь почти одновременно вместе с ним, и образует необратимый отход в виде диска перед поршнем (в случае многогнездных форм) или в виде локального утолщения на изделии (в тех одногнездных формах, где торцевая поверхность литьевого поршня составляет часть поверхности оформляющей полости), что при низкой точности дозирования вызывает неоправданный прирост массы отливки. С повышением же точности дозирования этот прирост уменьшается.

Реализация третьего требования (максимально возможное повышение температуры массы дозы реактопластов и резиновых смесей), сокращая время дальнейшего прогрева в форме, приводит к сокращению времени цикла формования и повышению качества продукции (в первую очередь, массивных изделий из резиновых смесей) вследствие повышения однородности степени вулканизации в массе изделий.

Четвертое требование (максимальная однородность распределения температуры в массе дозы) также создает возможность сокращения времени цикла. Действительно, при наличии ограничения на максимально допустимую температуру массы дозы, связанного с вероятностью нежелательного отверждения в пластикационном (или литьевом) цилиндре, вследствие значительной температурной неоднородности только часть мате-

риала дозы может иметь максимально допустимую температуру; при отсутствии неоднородности вся масса дозы может быть доведена до этой температуры. Очевидно, что в последнем случае может быть достигнуто большее общее теплосодержание массы дозы и в связи с этим потребуется меньшее время на последующий прогрев материала в форме.

При литье термопластов удовлетворение этого требования, во-первых, обеспечивает минимальное напряженное состояние материала отлитых изделий и равномерное заполнение оформляющей полости литьевой формы [143], а во-вторых, способствует сокращению времени цикла формования. Последний фактор становится очевидным, если учесть, что процесс литья предпочтительно вести при минимально допустимой по условиям заполнения формы температуре расплава $T_{\min}$, так как в этом случае время операции выдержки на охлаждение оказывается наименьшим. Обеспечение же условий $T_{\min}$ для всей массы накопленной дозы оказывается возможным только при удовлетворении требования максимальной температурной однородности дозы.

Последнее, пятое требование к параметрам дозы также требует пояснения. Существующее сейчас основное правило, которым в большинстве случаев руководствуются в практической технологии литья реактопластов и резиновых смесей, заключается в том, что операцию пластикации стремятся вести таким образом, чтобы избежать химических превращений. Исключение составляет литьевое формование изделий из химически вспениваемых смесей, при котором разложение порофора (но не реакция вулканизации) технологически просто осуществляется в пластикационном цилиндре. Однако такой принцип является тормозом интенсификации литьевого метода. Действительно, во-первых, этот принцип накладывает жесткое ограничение на максимально возможную температуру дозы, входя в противоречие с третьим отмеченным выше требованием. Во-вторых, с целью сокращения общего времени пребывания материала в форме (т. е. сокращения цикла формования) степень протекания реакции отверждения (вулканизации) в дозе к моменту впрыска в форму должна быть такой, чтобы начало заметного повышения вязкости расплава (момент начала подвулканизации) совпало с концом этапа заполнения формы. Из этого следует вывод, что пластикацию предпочтительно вести в условиях протекания реакции, а конструкция и режим работы пластикатора должны обеспечивать строго контролируемую и однородную по массе дозы степень вулканизации (отверждения).

Основным препятствием реализации этих положений является существующая пока нестабильность вулканизационных и вязкостных свойств исходного сырья. Тем не менее ниже рассмотрены мероприятия, способствующие освоению этого подхода к интенсивному ведению процесса пластикации.

Применительно к термопластам это требование становится понятным, если учесть, что пребыванию их в состоянии расплава всегда в большей или меньшей степени сопутствует термодеструкция. Естественным является стремление вести процесс пластикации таким образом, чтобы степень термодеструкции материала в дозе была минимальной.

Особенно важно рассматриваемое требование при литьевом формировании изделий из химически вспениваемых резиновых смесей и вспениваемых термопластов. Литье вспененных изделий возможно в двух основных режимах. Первый режим: быстрое и полное заполнение формы монолитным расплавом, в котором газообразные продукты разложившегося порофора находятся в растворенном состоянии; последующее частичное раскрытие формы сопровождается вспениванием материала отлитого изделия [144]. Второй режим: впрыск в полностью сомкнутую форму дозы расплава, заполняющей часть оформляющей полости, с последующим самопроизвольным заполнением оставшейся части за счет вспенивания расплава разложившимся в ней порофором. Очевидно, что чем более полным будет разложение порофора в резиновой смеси перед впрыском (т. е. в конце пластикации), тем раньше может быть начата операция вспенивания в первом режиме и тем более однородным по структуре будет материал изделия во втором режиме. Что же касается термопластов, то завершение реакции вспенивания в литьевой форме оказывается в принципе невозможным вследствие быстрого охлаждения в ней расплава, и единственно приемлемым является максимально полное разложение порофора в течение пластикации. Очевидно, что однородная по всей массе степень разложения порофора является необходимым условием однородности структуры вспененного материала изделия.

5.3.2. Процессы, протекающие в канале червяка

Возможность удовлетворения рассмотренных выше требований, предъявляемых к накопленной червяком дозе, непосредственно зависит от характера процессов, протекающих в канале червяка.

Производительность червячных пластикаторов существенно зависит от частоты вращения червяка и давления расплава на выходе из его канала (давления пластикации), которое управляется задаваемой величиной давления в гидроцилиндре впрыска в течение операции пластикации. На рис. 5.12 приведена эта зависимость для некоторых марок реактопластов. Подобный же вид имеет характеристика $Q(p)$ для резиновых смесей [134] (рис. 5.13) и термопластов. Производительность в реализуемом на практике диапазоне давлений пластикации для реактопластов относительно слабо зависит от давления пластикации (однако существенно различна для разных типов материалов). Для резиновых смесей и термопластов производитель-

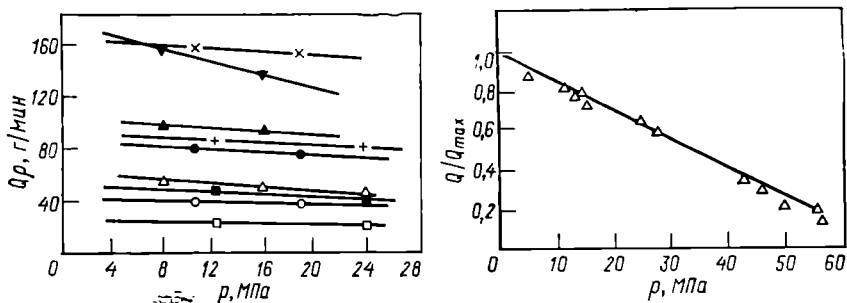


Рис. 5.12. Зависимость массовой пластикационной производительности Q_p при переработке реактопластов в червячном пластикаторе с диаметром червяка 40 мм и глубиной канала 4 мм от давления пластикации p и частоты вращения червяка N :

Материал	$N=1/6 \text{ с}^{-1}$	$N=1/3 \text{ с}^{-1}$	$N=2/3 \text{ с}^{-1}$
03-010-02 К-18-24 Аминопласт А2	△ ○ □	▲ ● ■	▼ × +

Рис. 5.13. Зависимость отношения объемной пластикационной производительности Q к максимальному ее значению Q_{max} от давления пластикации p для резиновой смеси.

ность уменьшается с ростом давления гораздо более интенсивно.

Очевидно, что если время набора дозы лимитирует сокращение цикла формования, то необходимо с точки зрения повышения производительности стремиться работать при максимальных частотах вращения червяка и минимальных давлениях. Это, однако, оказывается необходимым только при работе многопозиционного оборудования. В этом случае время набора дозы совмещено с машинной операцией перевода узла впрыска от уже заполненной формы к следующей, причем время этой операции намного меньше, чем время набора дозы, т. е. чем скорее будет накоплена доза, тем раньше произойдет впрыск в следующую форму. В однопозиционном оборудовании длительность пластикации, как правило, меньше совмещенной с ней выдержки на отверждение или выдержки на охлаждение (для термопластов), так что с рассмотренной точки зрения сокращение времени набора дозы не ведет к сокращению цикла, однако, как будет показано ниже, в этом случае имеются иные факторы, требующие минимизации времени набора дозы.

Существуют вполне определенные пределы повышения частоты вращения червяка и снижения давления пластикации (об ограничениях, накладываемых на давление, см. раздел 5.3.3). Интенсивность возрастания температуры материала в процессе транспортировки в канале червяка определяется дву-

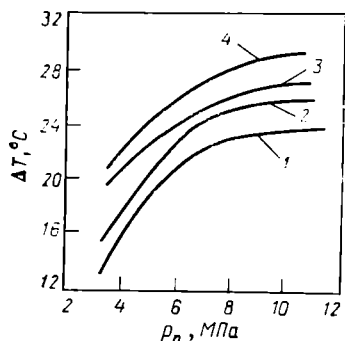


Рис. 5.14. Зависимость превышения ΔT температуры реактопласта на выходе из канала червяка над температурой цилиндра от давления пластикации p и частоты вращения червяка N , равной:

1 — 15 об/мин; 2 — 25; 3 — 35; 4 — 45 об/мин.

ния скольжения материала о стенки канала червяка и цилиндра [146, 147] (для реактопластов). На начальной стадии транспортировки тепловой поток направлен от стенок цилиндра и червяка к материалу. В дальнейшем вследствие диссипативных тепловыделений температура материала начинает превышать температуру цилиндра, и тепловой поток между материалом и стенкой цилиндра оказывается направленным в сторону последнего. Таким образом, на выходе из канала червяка температура расплава оказывается на 15—35 К выше температуры цилиндра [147]. При учете этого механизма разогрева материала понятна зависимость температуры материала на выходе из червяка, показанная на рис. 5.14 [134, 147]*: возрастание частоты вращения, повышая интенсивность деформирования и, следовательно, тепловыделений, приводит к росту температуры. В результате повышения давления перед червяком, препятствующего транспортировке материала, увеличивается время пребывания материала в канале червяка и интенсивность его деформирования, что также приводит к росту температуры. Приблизительная оценка температуры T_b на выходе из канала червяка (после продолжительного вращения его) может быть выполнена для резиновых смесей по следующему эмпирическому выражению [134]:

$$T_b = T_{\text{ц}} + aN + bp \quad (5.2)$$

где $T_{\text{ц}}$ — температура цилиндра; N — частота вращения червяка (об/мин); p — давление пластикации (МПа); a и b — коэффициенты.

Значения коэффициентов a и b для трех типов резиновых смесей приведены в табл. 5.1.

Более точная оценка зависимости T_b от N может быть выполнена по формуле (5.4) [148] при условии, если известны константы n , t_0 , B реологического уравнения в форме «степен-

* Подобная же зависимость имеет место для термопластов и резиновых смесей.

Таблица 5.1. Значения коэффициентов a и b для различных резиновых смесей

Резиновая смесь на основе каучука	a (об/мин) $^{-1}$ при температуре корпуса			b , МПа $^{-1}$
	323 К	343 К	363 К	
НК	0,10	0,10	0,07	0,7
СКН-40	0,34	0,29	0,32	1,0
СКН-18 и наирит	0,29	0,20	0,22	1,0

ного закона»

$$\tau = m(T) \dot{\gamma}^n; \quad m(T) = m_0 \exp(B/T) \quad (5.3)$$

где τ , $\dot{\gamma}$ — напряжение и скорость сдвига соответственно.

Зависимость, полученная в результате математического описания процессов деформирования и теплообмена в канале червяка и справедливая как для термопластов, так и для резиновых смесей, имеет следующий вид:

$$\theta = F \exp \frac{E}{\theta + 1}$$

$$\theta = (T_b - T_{\text{ц}})/T_{\text{ц}}; \quad F = m_0 V^{n+1} h^{1-n} / (12 \lambda T_{\text{ц}}); \quad E = B/T_{\text{ц}} \quad (5.4)$$

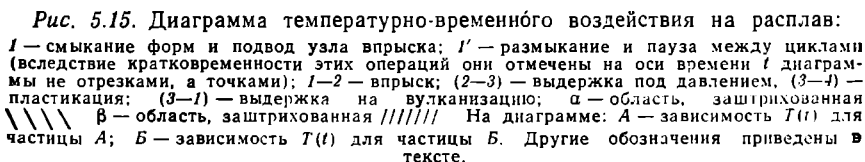
где V — окружная скорость гребня нарезки червяка; h — глубина канала червяка; λ — теплопроводность.

Из вида зависимости $T_b(N, p)$ ясно, что с целью повышения температуры расплава пластикацию желательно вести при повышенных частотах вращения червяка, а если время набора дозы не лимитирует времени общего цикла, то и при повышенных давлениях пластикации.

Предел повышения N и p определяется достижением максимально допустимой температуры материала, которая для реактопластов и резиновых смесей обусловливается минимальностью времени цикла: начало подвулканизации материала (для реактопластов — момент исчерпания плато вязкости) должно наступить в форме практически одновременно (но не ранее) с окончанием заполнения оформляющей полости [149]. Наступлению подвулканизации соответствует вполне определенное значение критерия $J = J_*$, учитывающего суммарное температурно-временное воздействие на материал в течение периода t_* с момента попадания его в цилиндр до момента начала роста вязкости. Выражение для критерия J_* , по смыслу эквивалентного степени протекания реакции отверждения (вулканизации), имеет следующий вид [149]:

$$J_* = \int_0^{t_*} \exp \left[-\frac{u}{RT(t)} \right] dt \quad (5.5)$$

где u — энергия активации реакции отверждения (вулканизации), являющаяся характеристикой перерабатываемой композиции; R — универсальная газовая постоянная; $T(t)$ — переменная в процессе переработки температура материала.



На рис. 5.15 показана диаграмма $T(t)$ для двух материальных частиц A и B , расположенных в начальном и конечном участках накопленной дозы. Характер $T(t)$ существенно зависит от отношения объема канала нарезки червяка к объему дозы. Для простоты рассуждений предположим, что оно равно 2. Таким образом, в течение каждой операции пластикации в дозу выдается половина объема материала, содержащегося в канале нарезки (с целью упрощения и для большей наглядности пренебрегаем также перемещениями материальных частиц во время пребывания их в канале червяка при осевом смещении его в течение впрыска). Из этого очевидно, что частица A в одном из предшествующих циклов (назовем его циклом I) попала из загрузочного окна в канал червяка (точка «а» на диаграмме рис. 5.15) в начале операции пластикации, а частица B — в конце этой операции. Дальнейшие перемещения этих частиц проследим по схеме пластикатора и диаграмме.

Итак, частица A попала в точку «а» канала червяка в момент начала пластикации цикла I (точка 3_I на диаграмме)*. Имея вначале температуру T_0 , она переместится к концу пластикации в точку «б» (переднюю точку первой половины объема канала нарезки червяка), нагревшись при этом до некоторой температуры, что соответствует моменту времени 4_I . Если пренебречь, как отмечалось, осевыми перемещениями червяка при впрыске, то частица будет пребывать в точке «б» до начала пластикации следующего цикла II (точка 3_{II}), продолжая прогреваться только за счет теплообмена с червяком и цилиндром и приближаясь по температуре к температуре последнего $T_{\text{ц}}$. В течение пластикации цикла II (3_{II} — 4_{II}) частица A переместится в точку «в» на выходе из канала червяка и вследствие диссипативных тепловыделений приобретет температуру, значительно более высокую, чем температура цилиндра $T_{\text{ц}}$. Она будет пребывать в точке «в» до начала впрыска в цикле III (точка 1_{III}), охлаждаясь при этом за счет контакта с более холодной стенкой цилиндра. При впрыске (точка 1_{III}) червяк перенесет ее в точку «г», где охлаждение будет продолжаться вплоть до начала пластикации (точка 3_{III}). Непосредственно в начале пластикации частица, находясь на выходе из канала червяка и не успев сколько-нибудь нагреться за счет деформирования в нем, попадает в переднюю часть формируемой дозы (позиция «д»), где пребывает вплоть до начала впрыска (точка 1_{IV}) в цикле IV . В начале впрыска, пройдя сопло и литевой канал формы, частица нагревается за счет работы продавливания через них и попадает к концу впрыска 2_{IV} в точку «е» полости формы. Таков характер температурно-временного воздействия $T(t)$ на частицу A вплоть до момента конца впрыска.

Подобные же рассуждения для точки B дают возможность определить вид диаграммы $T(t)$ и для частицы B . Отметим лишь некоторые особенности диаграммы этой частицы. Попадая в точку «а» в конце пластикации цикла I (момент 4_I), частица находится здесь до начала пластикации следующего цикла II (момент 3_{II}), почти не нагреваясь, так как область цилиндра у загрузочного окна, как правило, охлаждается. При пластикации в цикле III частица B находится в канале червяка практически в течение всего периода (3_{III} — 4_{III}), нагреваясь при этом за счет диссипативных тепловыделений до температуры, гораздо большей $T_{\text{ц}}$, и только по истечении этого периода (момент 4_{III}) попадает в концевую часть дозы (позиция B). Пребывает здесь она вплоть до начала впрыска в следующем цикле IV , практически не охлаждаясь, так как диаметр дозы во много раз больше глубины канала червяка, и,

* Здесь и далее индексы у цифр — обозначение порядкового номера цикла на диаграмме.

следовательно, интенсивность кондуктивного теплообмена со стенкой цилиндра здесь несоразмерно мала.

При впрыске (1_{IV} — 2_{IV}) частица B перемещается в позицию, близкую к точке « ∂ » (чуть ближе к соплу), однако не попадает в форму, оставаясь в остатке дозы. И только при впрыске цикла V она попадает в форму (позиция около точки « e »).

Смещая диаграмму $T(t)$ для частицы B влево до совмещения начала роста T для частиц A и B (кривая B'), видим, что воздействие $T(t)$ на частицу B существенно больше (на величину площади α), следовательно, значение J для нее максимально и именно оно лимитирует максимально возможную температуру расплава дозы $T_{\max}$. Значения машинных параметров N и p , обеспечивающих достижение температуры $T_{\max}$, могут быть определены из следующего соотношения:

$$J_{\max} = \sum_{i=1}^{i=k} \int_{t_{i-1}}^{t_i} f(t) dt \leq J_*; \quad f(t) = \exp \left[-\frac{u}{RT(t)} \right] \quad (5.6)$$

где t_{i-1} и t_i — начальный и конечный моменты i -го временного интервала, характеризующегося видом $T(t)$, соответствующим i -й операции цикла; k — интервал, соответствующий операции впрыска данной материальной частицы в форму.

Для точки B соотношение (5.6) имеет следующий конкретный вид:

$$\underbrace{\int_{t_{3II}}^{t_{4II}} f(t) dt}_{J_1} + \underbrace{\int_{t_{4II}}^{t_{3III}} f(t) dt}_{J_2} + \underbrace{\int_{t_{3III}}^{t_{4III}} f(t) dt}_{J_3} + \underbrace{\int_{t_{4III}}^{t_{2V}} f(t) dt}_{J_4} \leq J_* \quad (5.7)$$

Входящие в J_i функции $T(t)$ можно аппроксимировать линейными, приняв следующие значения температур в узловых точках:

$$\begin{aligned} T \Big|_{t=t_{3II}} &= T_0; & T \Big|_{t_{4II} < t < t_{3III}} &= \text{const} = T_a; \\ T \Big|_{t_{4III} < t < t_{2V}} &= \text{const} = T_b \end{aligned} \quad (5.8)$$

Значение T_b можно определить по формуле (5.4), в которую входят искомые в данном случае величины машинных параметров — максимально допустимая частота вращения червяка $N_{\max}$, связанная с окружной скоростью червяка V , и температура цилиндра T_{II} . Более точно вид $T(t)$ в течение периода пластикации t_{3II} — t_{4II} и t_{3III} — t_{4III} можно определить по следующей формуле [150], описывающей изменение средней по сечению

температуры массы при перемещении ее по каналу червяка:

$$\frac{T_{t_4} - T(t)}{T_{t_4} - T_{t_3}} = \exp(-\bar{z}); \quad \bar{z} = 12a \frac{t}{h^2} \quad (5.9)$$

где t — текущее значение времени пластикации; a — температуропроводность материала; T_{t_3} и T_{t_4} — температуры его в начале и в конце пластикации в соответствии с (5.8).

Следует отметить, что длительность пластикации (интервал интегрирования для J_1 и J_3) также есть функция параметров N и p , так как период пластикации t_{3-4} связан с производительностью пластилятора Q и требуемой массой дозы M :

$$t_{3-4} = M/(Q\rho) \quad (5.10)$$

Величина Q определяется известной рабочей характеристикой пластилятора:

$$Q = f(N, p, T_{11}) \quad (5.11)$$

Таким образом, сочетание машинных параметров цикла, обеспечивающих максимально допустимую температуру расплава дозы, контролируемую условием (5.5), может быть определено с помощью выражений (5.6)—(5.11). Подобную же методику можно использовать и для общего случая, когда отношение объема канала червяка к объему дозы не равно 2, а также с учетом осевых смещений частиц в канале червяка при впрыске (последнее уточнение не вносит существенных изменений в количественные результаты данного анализа).

Поскольку удовлетворение условия (5.5) возможно при различных сочетаниях параметров N , p и T_{11} , необходимы другие условия, накладывающие дополнительные ограничения на выбор их значений. Об ограничениях подобного рода на величину p сказано ниже.

Температурное воздействие в червячном пластиляторе при пластикации термопластов качественно подобно рассмотренному. Кинетические закономерности реакции термодеструкции также подобны таковым для реакции отверждения (вулканизации) реактопластов (резиновых смесей), так что степень термодеструкции количественно может быть оценена при помощи выражения (5.5). В данном случае под J_* нужно понимать максимально допустимую (по тем или иным соображениям) степень термодеструкции (например, применительно к композициям на основе ПВХ со стабилизаторами — такую степень термодеструкции полимера, при которой действие стабилизатора уже оказывается исчерпанным). Приведенные выше рассуждения оказываются также приемлемыми для прогнозирования максимально допустимой температуры литья термопластов, что чаще всего необходимо при переработке высоковязких термопластов с низкой термостабильностью.

Из рассмотренного очевидно, что различные участки дозы расплава характеризуются не только различной степенью вул-

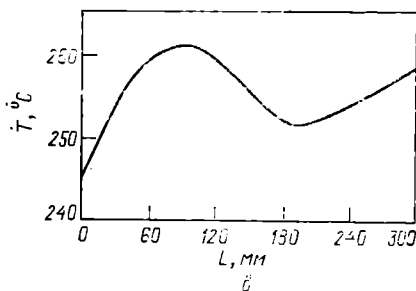
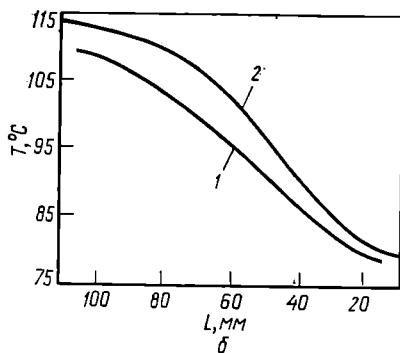
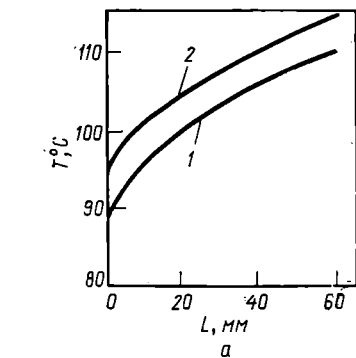


Рис. 5.16. Распределение температуры материала по длине накопленной дозы для реактопластов [151] (а), резиновых смесей [152] (б) и термопластов [154] (в):

$N=30$ об/мин; $T_{\text{н}}=348$ К; p равно 1 МПа
(1) и 15 МПа (2);
б: $N=85$ об/мин; $T_{\text{н}}=348$ К; p равно 0,7 МПа
(1) и 3 МПа (2);
в: $N=62$ об/мин; диаметр червяка 60 мм;
материал — АБС-пластик.

канализации, но и различной температурой массы. Значительная продольная неоднородность температуры [147, 151, 152] (рис. 5.16, а, б) также является нежелательным фактором. Действительно, для достижения максимальной производительности при литье термопластов необходимо, чтобы температура впрыскиваемого в форму расплава имела минимально допустимое значение по условию заполнимости формы. Если имеет место существенная температурная неоднородность дозы, то только некоторая малая часть расплава в дозе может иметь эту температуру; повышенное теплосодержание остальной части дозы обуславливает большое время охлаждения в форме, приводя к снижению производительности.

Для реактопластов и резин длительность выдержки материала в форме после впрыска и, следовательно, длительность цикла лимитируются не максимальными, а минимальными значениями распределенных параметров дозы T и J . Очевидно, что любое мероприятие, направленное на повышение однородности распределения этих параметров в дозе, позволяет достичь их максимальных значений во всей массе дозы.

Первое мероприятие заключается в термостатировании области цилиндра у дозы расплава независимо от остальной части цилиндра и поддержании ее температуры примерно равной температуре $T_{\text{в}}$ для частицы Б на выходе из канала червяка.

Это позволяет предотвратить охлаждение периферии массы дозы в конечной области ее.

Второе мероприятие, направленное на повышение однородности J , заключается в уменьшении остатка дозы в цилиндре после ее впрыска (что неизбежно требует повышения точности дозирования). Действительно, при сведении массы остатка к нулю частица B может быть впрыснута в форму не в период t_{1V-2V} , а на цикл раньше, т. е. в период $t_{1IV-2IV}$, как показано на диаграмме II рис. 5.15 точками. При этом разность J по массе, первоначально определявшаяся площадью области α , уменьшается на величину площади области β . Таким образом, повышение точности дозирования уменьшает долю массы со значением J , существенно отличным от значения этой величины для основной части массы.

Независимо от стремления к повышению однородности по J необходимо принимать меры к однородности по T_b . Зависимость температуры T_b на выходе из канала червяка (см. рис. 5.14) от N и p дает возможность влиять на T_b , изменяя N или p в процессе пластикации; в частности, возможно их изменение, противодействующее естественному изменению температуры, показанному на рис. 5.16. Основной особенностью этих задаваемых функций $p(t)$ или $N(t)$, очевидно, должно являться большое первоначальное их значение с монотонным затухающим уменьшением во времени. Однако существенная неоднородность $T_b(L)$ (см. рис. 5.16) требует столь же большого диапазона изменения $p(t)$ или $N(t)$. Значительное изменение N от $N_{\max}$ до $N_{\min}$ крайне нежелательно, так как, во-первых, удлиняет время пластикации, а во-вторых, с учетом сказанного выше, не дает возможности достичь максимально допустимое значение T_b .

На практике нашло в связи с этим применение схем, реализующих режим пластикации $p(t)$, причем задаваемый вид $p(t)$ подбирается экспериментально. Одна из таких схем программного изменения p приведена на рис. 5.17 [153]. Червяк 1, вращаясь (привод на вращение не показан) и накапливая перед собой дозу, перемещается вправо. Связанный с ним поршень 2 гидроцилиндра 3 выдавливает масло из поршневой полости через электромагнитный сервоклапан 4 в бак 5 гидропривода машины. Связанный с червяком ползун 6 приводит в действие датчик осевого положения червяка 7, который выдает сигнал в виде функции $L(t)$ в блок программы 8. В него заранее заложена программа

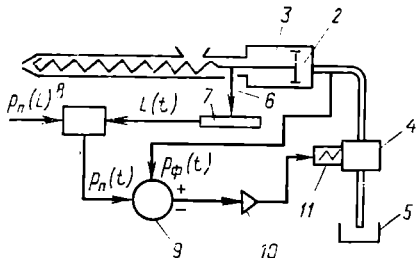


Рис. 5.17. Схема программного изменения давления пластикации в процессе набора дозы. Пояснения в тексте.

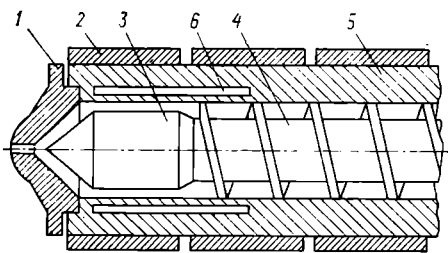


Рис. 5.18. Конструктивная схема пластикационного цилиндра, обеспечивающего температурную однородность дозы расплава. Пояснения в тексте.

$p_n(L)$, представляющая набор значений p , которые должны соответствовать каждому осевому положению червяка L .

Поступивший в блок программы 8 сигнал $L(t)$ «считывает» программу $p_n(L)$, и из блока 8 выдается сигнал в виде $p(t)$; в каждый момент времени он сравнивается с фактическим значением давления в поршневой полости гидроцилиндра $p_r(t)$. Сравнение сигналов осуществляется в блоке 9. Разность этих сигналов (положительная или отрицательная) подается в усилитель 10, из которого в виде команды на увеличение или уменьшение p_r подается на исполнительный орган 11 клапана 4.

Очевидно, что системы, подобные описанной, не способны обеспечить полного выравнивания температуры массы дозы, так как диапазон естественного изменения температуры дозы, достигающий 30 К (см., например, рис. 5.16, а), значительно превышает диапазон регулирования T посредством изменения p в реально возможных пределах (см. рис. 5.14). Кроме того, неизбежное при этом очень значительное увеличение p приводит к ощутимому уменьшению Q , что, как отмечалось, нежелательно.

Более прогрессивным является обеспечение требуемой однородности температуры не путем программного изменения значений машинных параметров в процессе пластикации, что значительно удорожает литейное оборудование, снижает надежность и усложняет его эксплуатацию, а путем конструктивных изменений рабочих органов. Одно из таких решений приведено ниже [150].

На рис. 5.18 показана часть пластикационного цилиндра 5 и червяка 4, оснащенного торпедой 3. Цилиндр может иметь электрообогрев 2 или рубашку жидкостного термостатирования, что в данном случае не принципиально, обязательным только является наличие каналов жидкостного термостатирования 6, расположенных возможно более близко к рабочей поверхности цилиндра, причем протяженность каналов вдоль оси цилиндра такова, что охватывает пространство, начиная от сопла 1 и кончая местом, в которое приходится правый конец торпеды при крайнем правом положении червяка. Таким образом, кольцевой канал, образованный рабочими поверхностями торпеды и цилиндра, термостатируется при любом осевом положении червяка. При надлежащем выборе длины и диаметра торпеды такая конструкция обеспечивает достижение, во-первых, практически постоянной во времени температуры ма-

териала, выходящего из канала торпеды и формирующего дозу расплава, несмотря на значительные (до 30 К) изменения T_w на выходе из канала червяка (т. е. на выходе в канал торпеды), и, во-вторых, минимально возможной разности между температурой расплава в дозе и температурой стенки цилиндра. Достижение минимального значения этой разности необходимо, чтобы свести к минимуму уже упомянутое охлаждение периферийной части дозы за счет теплообмена с цилиндром, приводящее к радиальной температурной неоднородности.

Указанные свойства данной конструкции становятся понятными из приведенного ниже анализа тепловых процессов, протекающих в канале торпеды [150]. Этот анализ справедлив для термопластов и резиновых смесей, однако конечный эффект использования рассматриваемой конструкции аналогичен и при переработке реактопластов.

Уравнение энергии для расплава в канале торпеды, изображенном на рис. 5.19, имеет следующий вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial z} v_z(y) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + m(T) \left[\left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{n+1}{2}} \quad (5.12)$$

где ρ , c и λ — плотность, теплоемкость и теплопроводность соответственно; n и m определены выражением (5.3).

Уравнение (5.12) имеет следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} \text{а) } T(z, y) \Big|_{y=-w/2} &= T_c; & \text{б) } (\partial T / \partial y) \Big|_{y=0} &= 0; \\ \text{в) } T(z, y) \Big|_{z=0} &= T_n \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} \text{а) } T(z, y) \Big|_{y=+w/2} &= T_c; & \text{б) } (\partial T / \partial y) \Big|_{x=-w/2} &= 0; \\ \text{в) } T(z, y) \Big|_{z=0} &= T_n \end{aligned} \quad (5.13')$$

Условия (5.13) действуют для червяков, оснащенных каналом жидкостного термостатирования, который иногда выполняют на литьевых машинах больших типоразмеров. Условия (5.13') справедливы для нейтральных червяков. Приведенные ниже рассуждения реализуют условия (5.13), хотя совершенно аналогичным образом их можно применить и к случаю (5.13'). Здесь T_n — температура расплава на входе в канал торпеды.

Принимая выражения для поля

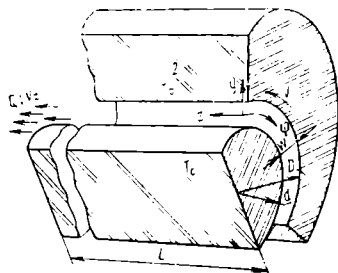


Рис. 5.19. Схема канала, образованного торпедой (1) и цилиндром (2).

скоростей в изотермическом приближении [155]

$$\begin{aligned} \text{а) } \frac{\partial v_\varphi}{\partial y} &= \frac{V}{\omega}; & \text{б) } \frac{\partial v_z}{\partial y} &= \frac{1}{\omega^2} \frac{2n+1}{n} \frac{Q}{\pi D} \left(\frac{2y}{\omega} \right)^{1/n} \\ & & & (5.14) \\ \text{в) } v_z &= \frac{2n+1}{n+1} \frac{Q}{\pi D} \frac{1}{\omega} \left[1 - \left(\frac{2y}{\omega} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \end{aligned}$$

вводя (5.14) в (5.12) и выполняя интегрирование, получаем решение в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{а) } \frac{\theta_\infty - \theta(\xi)}{\theta_\infty - \theta_n} &= \frac{\tilde{T}_\infty - \tilde{T}(\xi)}{\tilde{T}_\infty - T_n} = e^{-\xi}; & \text{б) } \theta_\infty &= Pf(\omega) \exp \frac{E}{\theta_\infty + 1}; \\ \text{в) } f(\omega) &= \omega^{1-n} [1 + (S/\omega)^2] \end{aligned} \quad (5.15)$$

Входящие в (5.15) безразмерные параметры P , ω , E , S , θ_∞ , θ_n и переменные ξ , θ имеют следующие выражения:

$$\begin{aligned} P &= \frac{m_0 V^{n+1} d^{1-n}}{12 \lambda T_c}; & \omega &= \frac{\omega}{d}; & E &= \text{см. (5.4), где } T_c = T_c; \\ S^2 &= \frac{n+1}{3n+2} \frac{(2n+1)^2}{2+n} \left(\frac{Q}{\pi D^2 N} \right)^2; \\ \xi &= \frac{n+1}{n} \left(\frac{1}{2} - \frac{n}{3n+1} \frac{n}{4n+1} \right)^{-1} \frac{\pi a}{\omega} z; \\ \theta &= \frac{\tilde{T}(\xi) - T_c}{T_c}; & \theta_\infty &= \frac{\tilde{T}_\infty - T_c}{T_c}; & \theta_n &= \frac{\tilde{T}_n - T_n}{T_c} \end{aligned} \quad (5.16)$$

здесь знак «тильда» над T означает осредненные по сечению канала значения температур (в дальнейшем для простоты записи он будет опущен); Q — объемная производительность червяка, определяемая его рабочей характеристикой (5.11); T_∞ — равновесная температура, которая реально достигается на выходе из зазора при достаточно большой его длине L (формально при $L \rightarrow \infty$); D — диаметр червяка; d — диаметр торпеды.

Следует заметить, что параметр S реально зависит только от степени псевдопластичности n , так как множитель $Q/\pi D^2 N$ является константой (величина Q изменяется пропорционально окружной скорости гребня нарезки червяка V или поверхности торпеды, что вследствие малости ω практически одно и то же).

Из решения (5.15б, в) ясно, что θ_∞ пропорционально $f(\omega)$; уменьшение $f(\omega)$ соответствует уменьшению T_∞ расплава, накапливаемого перед червяком. На рис. 5.20 показан вид $f(\omega)$ для значения $n=1/3$ (кривая 1), характерного для многих резиновых смесей. Функция $f(\omega)$ имеет острый минимум $f_0(\omega)$ при $\omega = \omega_0 = \omega_0/d$. Очевидно, что ω_0 — оптимальная высота канала торпеды, так как в этом случае обеспечивается желаемая минимальная разность температур расплава дозы и цилиндра. Входящий в (5.15в) параметр S , как отмечалось, не зависит от

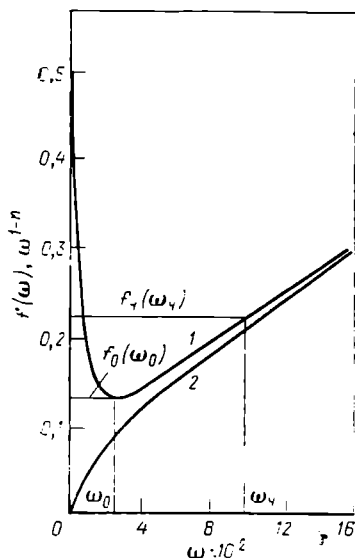


Рис. 5.20. Вид функции $f(\omega)$ по формуле (5.15 в) (кривая 1) и функции ω^{1-n} (кривая 2).

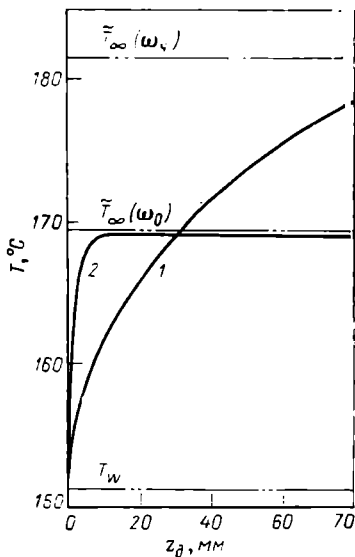


Рис. 5.21. Распределение температуры T по длине накопленной дозы:
1 — червяк без торпеды; 2 — червяк с торпедой.

режима пластикации, поэтому и значение ω_0 неизменно для всех режимов.

Видно, что при $S/\omega=0$ решение (5.15) оказывается подобным (5.4) и, следовательно, справедливым для канала червяка; в этом случае ω есть высота канала червяка h и $\omega_q=h/d$. С учетом того, что для большинства червяков $\omega_q \approx 0,1$ и в этой области вклад в $f(\omega)$ величины S/ω очень мал (см. кривую 2 на рис. 5.20), значение $f_q(\omega_q)$ можно определить по кривой 1. Значение $f_0(\omega_0)$ почти вдвое меньше $f_q(\omega_q)$, так что, применяя торпеду с оптимальной высотой канала ω_0 , можно уменьшить нежелательную разность температур $T_\infty - T_c$ также почти вдвое.

Повышение N приводит к значительному увеличению T_c по сравнению с установленным ее значением. Это очевидно, так как большая часть диссипативного теплового потока отводится от материала в стенку цилиндра. В режиме периодической пластикации, характерном для литьевого формования, это приводит к значительному возрастанию T_c в процессе набора дозы, что усиливает температурную неоднородность. В связи с этим обязательное условие получения постоянной температуры на выходе из канала торпеды состоит в надежном поддержании T_c на установленном уровне, что возможно при автономном интенсивном термостатировании рабочей поверхности цилиндра в области перемещения торпеды циркуляцией жидкости в кана-

лах (см. рис. 5.18). Это вполне осуществимо в литьевых машинах для резиновых смесей, имеющих жидкостные системы термостатирования пластикационных цилиндров.

Дальнейшие рассуждения поясняют второе свойство рассматриваемой конструкции: стабилизацию температуры расплава, попадающего в формируемую дозу.

Приведенный выше математический анализ выполнен при допущении работы пластикатора в установившемся режиме экструзии. Реальный режим — периодический, причем, как отмечалось, вследствие выстоя червяка перед очередной операцией пластикации при литье массивных изделий температура материала в последних витках червяка практически успевает принять значение T_c . С началом вращения червяка температура в этих витках начинает возрастать, стремясь к ее значению, соответствующему установившемуся режиму. По этой причине температура T_b материала, выходящего из канала червяка и попадающего в дозу, постоянно возрастает. Выражение (5.9) способно описывать изменение во времени значения T_b , причем вследствие отмеченного величины T_{t_4} и T_{t_3} в этом выражении принимают значения T_∞ и T_c соответственно. Получаемую по (5.9) функцию $T_b(t)$ нетрудно преобразовать в функцию $T(z_d)$ распределения температуры T по длине дозы z_d , которое соответствует варианту червяка без торпеды (кривая 1 на рис. 5.21).

Если червяк оснащен торпедой, то в данном нестационарном случае граничное условие (5.13в) также становится нестационарным:

$$T(z, y)|_{z=0} = T_n(t) \quad (5.17)$$

При этом температура $T_n(t)$ на входе в канал торпеды есть не что иное, как температура на выходе из канала червяка, т. е. $T(z_1)$, показанная кривой 1 на рис. 5.21 (координата z_d связана с временем от начала пластикации простым кинематическим соотношением).

Несмотря на общую нестационарность процесса, вследствие малости времени пребывания в канале торпеды в сравнении с общим временем пластикации и малости объема материала в этом канале, уравнение теплопроводности для канала и его решение на отрезке времени пластикации (за исключением начального очень малого его участка) могут быть сохранены в виде уравнений (5.12) и (5.15), (5.16). Интенсивность изменения T по длине канала торпеды z определяется множителем перед z в выражении (5.16) для ξ . Численная оценка показывает, что уже при $z \approx (0,3 \div 0,5)D$ величина $[\theta_\infty - \theta(\xi)]/[\theta_\infty - \theta_n(t)]$ достигает значений 0,05—0,03. Применительно к червяку с $D=36$ мм это значит, что при длине торпеды 10—16 мм температура расплава на выходе из ее канала с точностью до 1—1,5 К достигает своего установив-

шегося значения и остается практически постоянной и равной $T_{\infty}(\omega_0)$, несмотря на значительное изменение $T_n(t)$, достигающее 30 К (см. кривую 1 на рис. 5.21). На этом рисунке кривая 2 получена из решения (5.15), (5.16) при $T_c = \text{const}$ и условии (5.17), в котором $T_n(t)$ соответствует кривой 1. Преимущество червяка с торпедой очевидно.

В заключение следует отметить, что при использовании торпеды с $\omega = \omega_0$ эффект уменьшения нежелательной разности $T_{\infty} - T_c$ возрастает с уменьшением n , так что чем более псевдопластичен расплав, тем эффективнее применение торпеды.

5.3.3. Процессы, протекающие в дозе расплава

При пластикации реактопластов и высоковязких резиновых смесей в узлах впрыска типа «червяк-поршень» (рис. 5.2) доза при малых давлениях пластикации может быть немонолитной (рис. 5.22). Немонолитность снижает фактический объем впрыска по сравнению с максимально возможным, что нежелательно с точки зрения достижения максимально возможной массы отливки. Кроме того, при большой пористости дозы даже малые колебания машинных параметров (p , N , T_n) вызывают значительные колебания ее массы от впрыска к впрыску, что снижает точность и надежность дозировки. Чрезмерно высокие давления пластикации p , заведомо обеспечивающие монолитность дозы, нежелательны, так как снижают пластикационную производительность червяка (см. рис. 5.12 и 5.13). Таким образом, оптимальным значением p является минимально необходимое $p_{\min}$ для обеспечения достаточно монолитной дозы.

Количественные рассуждения, позволяющие прогнозировать величину $p_{\min}$ в зависимости от свойств материала и параметров пластикации, приведены ниже [156]. При $p \approx 0$ лента материала, выходящего из канала червяка, практически не изменяет конфигурации своего поперечного сечения, образуя кольцевой слой на поверхности пластикационного цилиндра. Толщина этого слоя практически равна глубине канала червяка на выходе из него. Степень заполненности высвобождаемого червяком объема, или относительную плотность набираемой дозы* $\bar{\rho}$ нетрудно вычислить, имея в виду, что для большинства червяков глубина канала h составляет примерно 0,1 от диаметра червяка D , т. е. $\bar{\rho}_0 = 0,4$.



Рис. 5.22. Продольный разрез дозы расплава реактопласта при малом давлении пластикации.

* Здесь $\bar{\rho}$ — отношение массы немонолитной дозы M к массе монолитной дозы $M_{\max}$ этого же объема. В данном случае $\bar{\rho} = \bar{\rho}_0$.

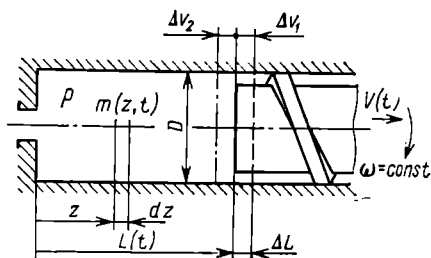


Рис. 5.23. Схема процесса набора дозы. Пояснения в тексте.

Если в полости поддерживается некоторое давление p , то порция материала, попадая в полость перед червяком, приобретает плотность ρ_0 , однако с ростом времени пребывания t_y в полости плотность порции возрастает. Так как время пребывания t_y различных порций массы в полости зависит от их координаты z (см. рис. 5.23), то и плотность накопленной части дозы также является функцией z и времени от начала процесса пластикации.

Масса дозы M может быть определена как

$$M = Q \cdot t \quad (5.18)$$

где t — время набора дозы с массой M ; Q — объемная производительность червяка; ρ — абсолютная плотность монолитного материала.

Однако для большинства червяк-плунжерных машин значение M устанавливается и регулируется не временем набора дозы t , а величиной осевого смещения червяка L . Таким образом, для установления непосредственной связи между параметром дозы M и регулирующим ее машинным параметром L необходимо знать функцию $L(t)$, которая определяется из следующих соображений (см. рис. 5.23).

За малый отрезок Δt вышедший из канала материал, приобретая плотность ρ_0 , принимает объем Δv_M . Этот объем оказывается размещенным в объеме Δv_1 , который освободил червяк, отойдя за время Δt на величину ΔL , и в объеме Δv_2 , на величину которого уплотнилась за время Δt немонолитная масса уже накопленной части дозы с длиной L , так что выражения для Δv_i очевидны:

$$\Delta v_M = \Delta v_1 + \Delta v_2 \quad (5.19)$$

$$\Delta v_M = Q \frac{1}{\rho_0} \Delta t; \quad \Delta v_1 = \frac{\pi D^3}{4} V \Delta t = \frac{\pi D^3}{4} \frac{dL}{dt} \Delta t \quad (5.20)$$

$$\Delta v_2 = \frac{\pi D^3}{4} \Delta t \int_0^L \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} \frac{1}{\bar{\rho}} dz \quad (5.21)$$

В (5.21) $\bar{\rho} = \bar{\rho}(z, t)$, причем эта функция пока не известна и определяется податливостью массы при уплотнении.

В работах [157, 158] показано, что как для реактопластов, так и для резин кинетика уплотнения немонолитной массы рас-

плавов полимеров удовлетворительно описывается следующим уравнением:

$$\bar{\rho}/dt = -\kappa(1-\bar{\rho})^k; \quad \kappa \approx 1,4^{k-1} p^k c \quad (5.22)$$

где $k=1/n$, $c=m^{-1/n}$, а m и n определены формулой (5.3).

Функция $\bar{\rho}(t_y)$ определяется интегрированием (5.22):

$$\bar{\rho}(t_y) = 1 - [(k-1)\kappa t_y + (1-\bar{\rho}_0)^{1-k}]^{\frac{1}{1-k}} \quad (5.23)$$

причем, как отмечалось, здесь $t_y = t_y(t, z)$. Функция $t_y(t, z)$ определяется следующим кинематическим соотношением:

$$t_y(t, z) = t \Big|_{L=L(t)} - t \Big|_{L=z} = \int_0^{L(t)} \frac{dL}{V(L)} - \int_0^z \frac{dL}{V(L)} = \int_z^{L(t)} \frac{dL}{V(L)} \quad (5.24)$$

Уравнения (5.22)–(5.24), позволяющие определить $\bar{\rho}(t, z)$, интегрируемое дифференциальное уравнение (5.19), которое при известной $\bar{\rho}(t, z)$ определяет функцию $L(t)$, и уравнение (5.18), решенные совместно, дают выражение $M(L, p, Q)$, с помощью которого определяется зависимость средней по объему дозы относительной плотности $\bar{\rho} = M/M_{\max}$ от машинных параметров L , p и $Q(p, N)$:

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{\rho}_0}{1 + \bar{\rho}_0} \left\{ 1 + \frac{1}{1 - (1 - \bar{\rho}_0) \left[1 - (vL + 1)^{\frac{1}{1-k}} \right]} \right\} \quad (5.25)$$

где

$$v = \left(2 \frac{1 - \bar{\rho}_0}{1 + \bar{\rho}_0} \right)^{k-1} \frac{\pi D^2}{4} \frac{k-1}{Q} c p^k$$

По выражению (5.25), задаваясь желаемой плотностью $\bar{\rho}$, можно определить значение минимально необходимого p при известных N , $L(M)$ и T . Как видно из рис. 5.24, точность выражения (5.25) достаточна для оценки необходимого $p_{\min}$.

Формула для оценки зависимости точности дозирования $\Delta \bar{\rho}$ может быть получена с использованием выражения для полного дифференциала функции $\bar{\rho}(p, L, T)$ [159]:

$$\Delta \bar{\rho} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{k \bar{\rho}_0 (1 - \bar{\rho}_0)}{(1 + \bar{\rho}_0)(k-1)} L \frac{(vL + 1)^{\frac{1}{1-k}} v}{\left\{ 1 - (1 - \bar{\rho}_0) \left[1 - (vL + 1)^{\frac{1}{1-k}} \right] \right\}^2} \times \\ \times \left(\frac{B}{T} \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta p}{p} \right) \quad (5.26)$$

Численный анализ этого выражения показывает, что при существующей на современном литьевом оборудовании точности

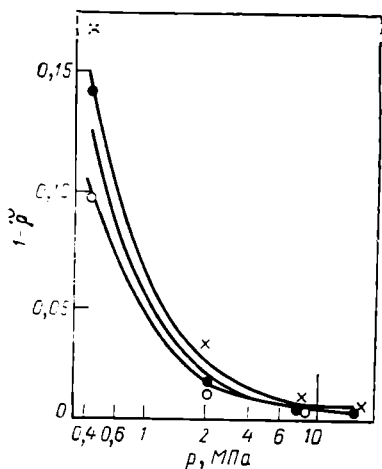


Рис. 5.24. Зависимость средней относительной плотности дозы ρ от ее длины L и давления пластикации p . Материал — 03-010-02; $N=50$ об/мин; $D=40$ мм. Кривые — расчет по формуле (5.25), точки — опыт со значениями L : $\circ$ — 92 мм, $\bullet$ — 30 мм, $\times$ — 12 мм.

($\Delta P_i/P_i$) поддержания требуемых значений регулируемых машинных параметров P_i (при жидкостном термостатировании пластикационных цилиндров) основной вклад в колебания массы дозы вносят флуктуации p , определяющиеся в основном степенью технического совершенства регулирующей аппаратуры гидропри-

вода. Представление о достижимой точности дозирования дает рис. 5.25.

При литье низковязких резиновых смесей и термопластов доза расплава оказывается практически монолитной даже при почти нулевых давлениях пластикации. Если же расплав содержит в большом количестве растворенные в нем газообразные вещества, то для предотвращения выделения их в самостоятельную фазу (и вспенивания материала дозы) перед червяком поддерживают давление около 4—5 МПа. При литье термопластов, если десорбция летучих из расплава не является лимитирующим фактором, давление перед червяком требуется поддерживать с целью достаточного уплотнения гранулята, размягчающегося в конце зоны загрузки, во избежание захвата воздуха в промежутках между гранулами.

5.4. ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ФОРМЕ НА ЭТАПЕ ВПРЫСКА

Заполнение литевой формы расплавом является ключевым процессом литевого метода формования полимерных материалов. Можно сформулировать следующее общее для всех трех классов полимерных материалов требование к условиям проведения операции впрыска: в конце этой операции весь объем оформляющей полости литевой формы должен быть заполнен монолитным расплавом, причем состояние последнего должно быть

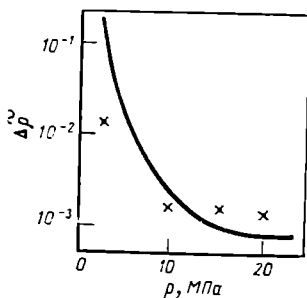


Рис. 5.25. Зависимость точности дозирования $\Delta \rho$ от давления пластикации p ; $N=50$ об/мин; $D=40$ мм; $L=92$ мм. Кривая — расчет по формуле (5.26); точки — опыт.

таким, чтобы остаточные напряжения в материале отвердевшего изделия были минимальными. Сущность же процессов в форме и условия их проведения, обеспечивающие удовлетворение этого требования, для термопластов, реактопластов и резиновых смесей принципиально различны и будут рассмотрены ниже.

5.4.1. Заполнение формы термопластами

Заполнение полости формы, температура которой ниже температуры кристаллизации (стеклования) полимера, происходит при непрерывном охлаждении расплава, причем вязкость его меняется в очень широких пределах: от некоторого значения при начальной температуре заполнения T_0 до бесконечности при температурах, близких к температуре кристаллизации. Естественно, при этих условиях путь растекания расплава в полости формы является конечной величиной, зависящей как от заданных параметров процесса (температур литья и формы, давления литья, начальной скорости заполнения) и геометрии оформляющей полости, так и от температуропроводности полимера и зависимости этой характеристики от температуры в интервале температур литья и формы.

Из рис. 5.26 видно, что характер зависимости коэффициента температуропроводности a от температуры для аморфных полимеров принципиально отличен от этой зависимости для кристаллических полимеров. Для аморфных полимеров в области температуры стеклования T_g приведенная зависимость не претерпевает изменений (фазовый переход второго рода), а наличие ярко выраженного минимума у кривой для полипропилена в узкой области $\Delta T_{пл}$ около температуры плавления T_* говорит о значительной скрытой теплоте плавления (фазовый переход

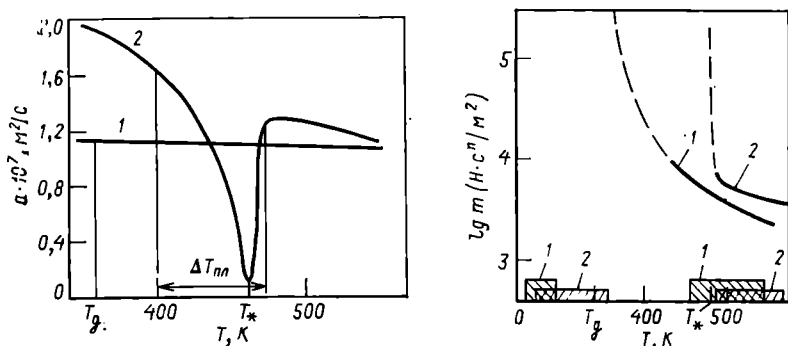


Рис. 5.26. Зависимость коэффициента температуропроводности a полистирола (1) и полипропилена (2) от температуры.

Рис. 5.27. Зависимость реологического коэффициента m от температуры для полистирола (1) и полипропилена (2). На оси абсцисс указаны: слева — диапазон температур стенки формы, справа — диапазон температур литья. Штриховые линии — экстраполяция опытных данных.

первого рода), что следует учитывать при анализе процесса заполнения формы.

Одной из наиболее распространенных форм реологического уравнения, описывающего деформационное поведение расплавов полимеров, является «степенной закон»:

$$\tau = m \dot{\gamma}^n \quad (5.27)$$

$$m = m_0 \exp \frac{b}{T - T_\phi}, \quad \text{где } T_\phi = T_g \text{ или } T_\phi = T_* \quad (5.28)$$

Температурная зависимость коэффициента m для аморфного и кристаллического полимеров представлена на рис. 5.27. На основании этих данных можно сделать следующие выводы: вязкость аморфного полимера монотонно растет с уменьшением температуры, обращаясь в бесконечность в области T_g ; вязкость кристаллического полимера, будучи менее чувствительной к температуре, в области T_* претерпевает скачок, обращаясь в бесконечность. Для аморфного полимера справедливо неравенство

$$T_g - T_c \ll T_0 - T_g \quad (5.29)$$

в то время как для кристаллического полимера

$$T_0 - T_* \ll T_* - T_c \quad (5.30)$$

где T_c — температура стенки формы.

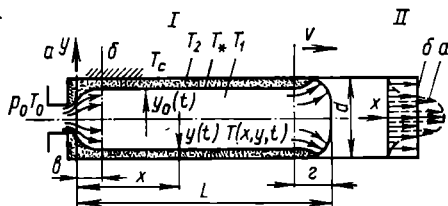
Учитывая эти заключения, а также то, что T_* намного больше T_c и что температура полимера в поперечном сечении канала меняется от некоторой максимальной до температуры стенки формы T_c , можно предположить следующее. При заполнении формы кристаллическим полимером имеются две области (см. рис. 5.28): застывшего на стенках, не участвующего в течении полимера с температурой T_2 , и текущего между ними расплава с температурой T_1 . При этом граница раздела ядра и застывших слоев (граница фазового перехода первого рода), имеющая температуру T_* , сосредоточена в довольно узкой области возле координаты $y_0(t)$, существенно меньшей, чем $d/2$, что подтверждается резким изменением характера функций $m(T)$ и $a(T)$ в узкой области около T_* (рис. 5.27).

При течении аморфных полимеров четко выраженная граница раздела фаз отсутствует, о чем свидетельствует монотонность зависимостей $m(T)$ и $a(T)$ для полистирола, а также неравенство (5.29), показывающее, что вся масса полимера (за исключением весьма тонкой пленки, которой можно пренебречь) участвует в течении. Таким образом протекает процесс заполнения полости формы кристаллическим и аморфным полимерами.

Для получения количественных зависимостей, связывающих требуемые для удовлетворительного заполнения формы вели-

Рис. 5.28. Схема течения расплава в полости формы:

I — заполнение полости формы; II — профиль скоростей.



чины параметров литья с геометрией формы и свойствами полимера, необходимо решение задачи о неизотермическом течении расплава в канале между параллельными пластинами (оформляющие полости литьевых форм чаще всего представляют собой каналы такой формы или могут быть приведены к ним), температура которых ниже температуры фазового перехода полимера. Точного решения этой задачи до сих пор не получено из-за ее чрезвычайной сложности. Решение в конечной аналитической форме возможно при введении изложенных ниже допущений.

Рассмотрим случай течения аморфного полимера. Для математической формулировки задачи используются уравнение неразрывности, уравнение движения, уравнение энергии совместно с реологическими уравнениями (5.27) и (5.28).

Течение расплава из области выпуска «а» по оформляющей полости «б» одномерно (за исключением областей «в» у выпуска и «г» у фронта потока, которыми пренебрегаем в силу их малости по сравнению с реальными длинами L растекания расплава) и направлено вдоль оси x неподвижной декартовой системы координат с центром у выпуска в оформляющую полость (см. рис. 5.28), так что для трех компонент скорости имеем:

$$v_x = v(x, y, t); \quad v_y = v_z = 0 \quad (5.31)$$

При допущении неупругости, несжимаемости, отсутствия теплового расширения расплава и квазистационарности режима течения из уравнения неразрывности следует, что

$$v_x = v_x(y) \quad (5.32)$$

Уравнение движения при принятых допущениях и при условии пренебрежения влиянием сил инерции и собственного веса расплава принимает вид

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \quad (5.33)$$

Реологическое уравнение в этом случае запишется как

$$\tau_{yx} = m \left[\frac{d}{dy} V_x(y) \right]^n \quad (5.34)$$

Реологический коэффициент m является функцией температуры T , которая в свою очередь является функцией координат материальной точки расплава и времени.

Совместное решение уравнений (5.33) и (5.34) при краевых условиях

$$\left. \frac{dv_x(y)}{dy} \right|_{y=0} = 0; \quad v_x(y) \Big|_{y=\bar{d}/2} = 0 \quad (5.35)$$

и при введении среднерасходовой скорости

$$V = \frac{2}{\bar{d}} \int_0^{\bar{d}/2} v_x(y) dy \quad (5.36)$$

имеет вид:

$$V = \frac{2}{\bar{d}} \left(\frac{dp}{dx} \right)^{\frac{1}{n}} J(y) \quad (5.37)$$

где

$$J(y) = \int_0^{\frac{\bar{d}}{2}} \left[\frac{y^{n+1}}{m(T)} \right]^{\frac{1}{n}} dy \quad (5.38)$$

Для определения $J(y)$ необходимо знать вид функции $T=T(y)$, которая должна быть найдена из уравнения энергии. Последнее при введении допущения о плоском профиле «б» распределения скорости расплава в поперечном сечении канала (см. рис. 5.28) вместо реального профиля «а», при принятии постоянства коэффициента температуропроводности (см. рис. 5.26) и пренебрежении тепловыделениями в расплаве за счет внутреннего трения при течении имеет вид:

$$\frac{dT}{dt_x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (5.39)$$

где t_x — время пребывания в полости поперечного сечения потока с координатой x ($0 \leq x \leq L$).

При подстановке решения уравнения (5.39), выражающего зависимость температуры расплава от координаты y и времени пребывания в форме t_x сечения с координатой x , в уравнение (5.37) и выполнении приближенного интегрирования, получим выражение:

$$V = \left(\frac{\rho_0 \bar{d}^{n+1}}{k L m_0 f} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5.40)$$

где

$$j = \frac{1}{L} \int_0^L \left\{ \exp \frac{b}{T_0 - T_c} \left[\exp \left(-\frac{10a}{\bar{d}^2} t_x \right) - \frac{T_g - T_c}{T_0 - T_c} \right]^{-1} \right\} dx \quad (5.41)$$

$$t_x = \int_{L-x}^L V^{-1} dL$$

где k — числовой коэффициент.

Произведение $m_0 j$ по физическому смыслу представляет собой среднемассовое значение коэффициента вязкости расплава m в исходном реологическом уравнении (5.27). Действительно, в пренебрежении охлаждением материала при течении, что может быть выражено условием

$$t_x = 0 \quad (5.42)$$

выражение (5.41) превращается в экспоненциальную функцию m от температуры литья T_0 в уравнении (5.28), а выражение (5.40) становится уравнением изотермического течения через плоскую щель.

Уравнение (5.40), устанавливая функциональную взаимосвязь между геометрией полости ($\bar{d}$, L), свойствами материала (a , m , n) и параметрами литья (в частности, давлением и скоростью течения), дает возможность определить последние для принятой категории изделий и материалов. За изменением скорости заполнения полости можно проследить, например, по графику на рис. 5.29, *а*, полученному при решении уравнения (5.40). Кривые 1 и 2 — зависимости скорости неизотермического течения и фактора j от длины затекания расплава в полость. Кривая 3, полученная при решении уравнения (5.40) совместно с условием (5.42), описывает процесс изотермического течения в полости при прочих равных условиях. Как видно из рис. 5.29, *а*, на начальных стадиях заполнения, когда степень охлаждения расплава невелика (о чем свидетельствует весьма малое изменение параметра j — среднемассовой величины экспоненты температурной зависимости реологического коэффициента m), характеры неизотермического и изотермического течения близки. Однако все возрастающая степень охлаждения расплава при течении приводит к резкому увеличению вязкости расплава (этап интенсивного возрастания параметра j) и соответствующему уменьшению скорости течения. Увеличению параметра j в 2,5—3 раза по сравнению с начальным его зна-

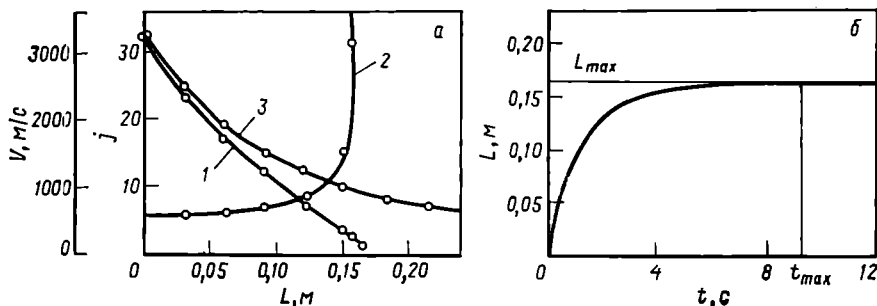


Рис. 5.29. Кинетические кривые процесса заполнения полости формы:

а — зависимость скорости неизотермического течения (1), фактора j (2) и скорости изотермического течения (3) в зависимости от длины затекания; *б* — зависимость длины затекания расплава от времени.

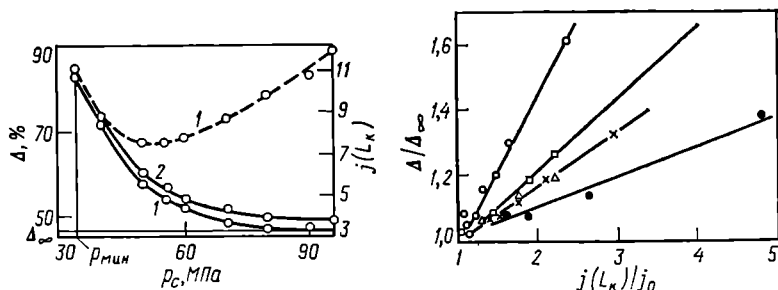


Рис. 5.30. Зависимость высокоэластической усадки пластины из полистирола размерами $30 \times 160 \times 1$ мм при отжиге Δ (кривая 1) и фактора среднemasсовой вязкости в конце этапа заполнения формы $j(L_\kappa)$ (кривая 2) от давления литья p ; $T_0 = 515$ К, $T_c = 313$ К; выдержка под давлением отсутствует (—) или составляет 4 с (---); $p_{\min}$ — минимальное давление литья, при котором форма начинает заполняться полностью.

Рис. 5.31. Корреляционная зависимость параметра $j(L_\kappa)$ и высокоэластической усадки Δ для изделия из полистирола толщиной 1 мм. Температура литья T_0 :

× — 448 К; ● — 466; △ — 493; □ — 500; ○ — 515 К.

чением соответствует практически конечная длина заполненной части полости формы.

График зависимости длины затекания L от времени t , полученный интегрированием зависимости $V(L)$, показан на рис. 5.29, б. Как видно из рисунка, полное время течения $t_{\max}$, соответствующее предельной длине отливки $L_{\max}$ (т. е. условию $j=0$ и $V=0$), довольно велико, однако основная часть длины (около 90% от $L_{\max}$) заполняется за 3 с; следующее за этим медленное течение вплоть до момента $t_{\max}$ существенно не влияет на полную длину отливки L .

Условия заполнения оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики отлитых изделий, так как охлаждение и частичное затвердевание материала в форме во время впрыска приводит к «замораживанию» в материале напряженного состояния и молекулярной ориентации, имевших место при течении расплава в оформляющей полости. Уровень остаточных напряжений, степень ориентации материала изделия и другие свойства достаточно надежно можно характеризовать величиной усадки изделия в направлении течения в форме при последующем нагревании изделия выше температуры стеклования (кристаллизации) на 30–40 К [160, 161].

На рис. 5.30 показана зависимость высокоэластической усадки Δ от давления литья, причем с целью определения влияния p на усадку только в течение впрыска операция выдержки под давлением из машинного цикла формования была исключена. Для каждого из реализованных в данных опытах значений p по выражениям (5.40) и (5.41) было подсчитано значение j , характеризующее, как было отмечено, степень охлаждения рас-

плава к концу операции впрыска (кривая 2). Функции $\Delta(p)$ и $j(p)$ качественно подобны, причем это подобие сохраняется во всей области температур литья (рис. 5.31) [162]. Таким образом, при выборе рационального сочетания параметров режима на стадии впрыска следует иметь в виду, что всякое изменение любого из параметров, способствующее уменьшению степени охлаждения расплава в процессе течения его в форме, влечет за собой снижение напряженного состояния материала изделия.

Количественные соотношения, описывающие кинетику не-изотермического заполнения формы, прогнозирующие максимально возможные пути растекания расплава (вплоть до полной остановки вследствие охлаждения расплава) или дающие возможность оценить степень совершенства данного конкретного режима литья по величине критерия степени охлаждения расплава, получены также и применительно к модели течения кристаллических материалов [163].

5.4.2. Заполнение формы термопластами при вибровоздействии

В последние годы в отечественной и зарубежной печати появились работы, в которых исследуются возможности повышения эффективности процессов литья полимеров за счет использования целенаправленной вибрации.

Реологические исследования последних лет показали, что интенсивное вибровоздействие может активно влиять на реологические характеристики однофазных и двухфазных полимерных систем. Существуют также работы, в которых демонстрируется успешное применение вибраций в промышленных установках по переработке полимеров [164, 165].

Различными авторами было предложено несколько принципиальных схем процессов литьевого и экструзионного виброформования, для реализации которых требуется специальное новое оборудование. Однако основной причиной, сдерживающей широкое промышленное использование данного метода литья, является отсутствие универсальной и достаточно эффективной схемы виброформования, осуществляемой с помощью несложной приставки, позволяющей реализовать вибрационный режим на любой действующей литьевой машине без существенного изменения ее конструкции. Другим серьезным фактором, сдерживающим применение виброформования в промышленности, является недостаточная изученность процессов литья под давлением, протекающих при вибровоздействии большой амплитуды и малой частоты.

Реологические характеристики, используемые при литье полимеров; выбор частотного диапазона воздействия на полимеры. При анализе процесса литья под давлением полимерных материалов необходимо в основном использовать стационарные и нестационарные

нарные реологические характеристики расплавов полимеров, полученные в условиях простого сдвига методами ротационной и капиллярной реометрии. В ряде случаев существенными оказываются также и реологические характеристики объемного деформирования полимеров.

Реологические характеристики сдвигового деформирования расплавов полимеров в области не очень высоких скоростей сдвига в настоящее время изучены достаточно хорошо. К числу их относится прежде всего кривая течения, т. е. зависимость скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от напряжения сдвига τ в стационарном режиме деформирования при заданной температуре T . Кривые $\dot{\gamma}(\tau, T)$ при $T = \text{const}$ для полимерных систем имеют вид, подобный виду кривых для псевдопластичных систем, так что эффективная вязкость $\eta_e(\dot{\gamma}, T)$ резко падает с увеличением $\dot{\gamma}$. Несмотря на то, что для чистых (т. е. без наполнителя) полимерных систем всегда существует наибольшая ньютоновская вязкость $\eta_0 = \eta_0(T)$, кривую течения в достаточно широком диапазоне скоростей сдвига удобно аппроксимировать в виде степенного закона:

$$\dot{\gamma} = a(T) \tau^n; \quad a(T) = a_0 \exp \frac{U}{RT} \quad (5.43)$$

где параметр $n > 1$ и обычно не зависит от температуры; U — энергия активации вязкого течения (при постоянном напряжении сдвига); R — газовая постоянная; a_0 — реологическая константа.

Помимо касательных напряжений в стационарных сдвиговых потоках оказываются существенными и нормальные напряжения, возникающие из-за конечной сдвиговой упругости полимеров, накопленной в сдвиговом стационарном течении. Однако в условиях стационарных деформаций нормальные напряжения не зависят от касательных. И хотя в ряде случаев нормальные напряжения могут существенно превосходить касательные, тем не менее они всегда гораздо меньше изотропного давления, градиент которого является основной движущей силой в процессе литья под давлением. Поэтому в практике технологических расчетов рассматриваемых процессов переработки полимеров действием нормальных напряжений можно пренебречь.

Достаточно хорошо в настоящее время изучены и сдвиговые реологические характеристики в типичных нестационарных режимах деформирования: предстационарные характеристики в режимах $\dot{\gamma} = \text{const}$, $\tau = \text{const}$, релаксационные характеристики нормальных и касательных напряжений, эффекты запаздывания, частотные зависимости в линейной и слаболинейной областях, а также эффекты наложения колебаний малой амплитуды на стационарное сдвиговое течение.

В предстационарной стадии течения и на стадии релаксации величины нормальных напряжений более значительны, так как в этих условиях наблюдается весьма сильное взаимодействие нормальных и касательных напряжений. Поэтому в быстропотекающих процессах необходимо с некоторой осторожностью пользоваться стационарными характеристиками. Смягчающим обстоятельством является то, что при повышении скоростей сдвиговых деформаций характерные времена релаксации, в течение которых проявляется комплекс нелинейных вязкоупругих свойств, резко уменьшаются, в связи с чем временные интервалы, в которых допустимо использование стационарных реологических характеристик, расширяются.

При очень больших скоростях деформации, реализуемых, например, при литье под давлением, возникает ряд неустойчивых явлений при течении полимеров, связанных с потерей текучести, пристенным (стационарным и нестационарным) скольжением, разрушением расплава (эти явления, как правило, делают невозможным высокоскоростную экструзию полимеров, так как приводят к резкому искажению формы экструдата). При литье под давлением эти эффекты менее существенны, поскольку литье термопластов происходит в замкнутую оформляющую полость с последующей выдержкой на охлаждение. Тем не менее и здесь анализ и учет этих факторов был бы полезен.

Области частот эффективного вибрационного воздействия на стационарное течение полимеров прослеживаются достаточно хорошо уже при анализе наложения малоамплитудных колебаний на стационарное сдвиговое течение полимерных расплавов. В настоящее время эти эффекты изучены достаточно подробно для многих полимерных расплавов [1]. Анализ данных позволяет сделать следующие выводы.

1. Существуют две характерные частотные области, в пределах которых вибровоздействие интенсифицирует процессы течения полимеров: верхняя область инфразвуковых частот (около 10 Гц) и ультразвуковые частоты (10^4 — 10^5 Гц).

2. В обеих частотных областях эффективность вибровоздействия зависит от интенсивности механических колебаний, определяемых произведением амплитуды на частоту, характера затухания вибрационных импульсов в исследуемом материале и способа приложения воздействия. Здесь следует отметить, что реологические частотные характеристики полимерных материалов исследуются, как правило, в одномерных условиях, исследования пространственного затухания частотных импульсов в полимерных материалах проводятся весьма редко.

3. Резкое возрастание затухания колебаний с увеличением частоты приводит к тому, что ультразвуковые сдвиговые колебания, наиболее эффективно действующие на процессы течения полимеров при приложении их по всей ширине канала, в котором течет полимер, в реальных условиях затухают на расстоя-

нии нескольких мкм от источника колебания. Поэтому воздействие ультразвука сводится к изменению реологических характеристик материала в тонком слое полимера у поверхности контакта его со стенкой. Вследствие этого создается впечатление, что применение ультразвуковых колебаний для интенсификации литья под давлением является технически нерациональным, так как требует расположения источников колебания по всей поверхности оформляющей полости.

4. В области низкочастотных колебаний эффект вибровоздействия на движение полимерных расплавов может быть существенным лишь при достаточно большой амплитуде колебаний. В этом случае, как показано ниже, можно реализовать различные схемы вибровоздействия, при которых колебания конечной амплитуды распределяются по большому объему расплава полимера и слабо затухают по мере удаления от источника колебаний. Таким образом, практический интерес представляет рассмотрение процесса распространения периодических колебаний большой амплитуды, наложенных на стационарное сдвиговое течение расплавов полимеров с целью оценки вибровоздействия на процесс литья под давлением.

Природа низкочастотного вибровоздействия большой амплитуды на течение полимерных материалов. Для количественных расчетов были получены реологические характеристики ударопрочного полисти-

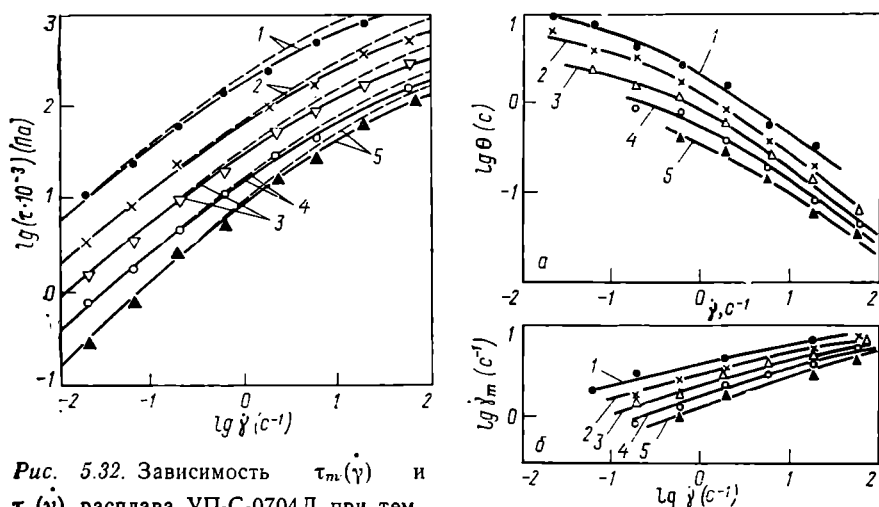


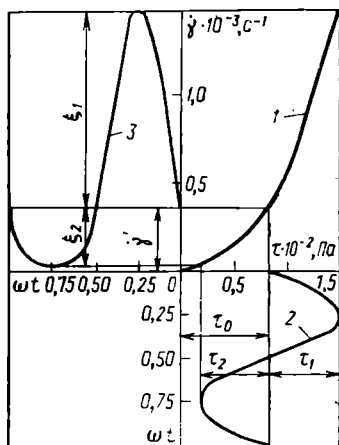
Рис. 5.32. Зависимость $\tau_m(\dot{\gamma})$ и $\tau_s(\dot{\gamma})$ расплава УП-С-0704Л при температуре:
1 — 453 К; 2 — 473; 3 — 493; 4 — 513; 5 — 533 К; — — — τ_m ; — — — τ_s .

Рис. 5.33. Зависимость $\theta(\dot{\gamma})$ и $\dot{\gamma}_m(\dot{\gamma})$ расплава УП-С-0704Л (а и б соответственно) при температуре:

1 — 453 К; 2 — 475; 3 — 493; 4 — 513; 5 — 533 К.

Рис. 5.34. Принцип вибровоздействия:

1 — кривая течения; 2 — колебания вида $\tau = \tau_0 + \tau_a \sin \omega t$; 3 — зависимость $\dot{\gamma}(\omega t)$, соответствующая кривой 2, где $\tau_1 = \tau_2 = \tau_a$; $\xi_1 > \xi_2$; $|\eta^*| = 2\tau_a / (\xi_1 + \xi_2)$.



рола УП-С-0704 Л натурального каучука, полиэтиленов 21008-075 и 20908-040 в широком диапазоне температур и значительном интервале скоростей деформаций. Исследования проводились на реогониометре Вайссенберга R-18, а также на специально сконструированном капиллярном виброреометре [116]. Изучались кривые течения, предстационарная стадия деформации и релаксации напряжений, наложение колебаний малой и большой амплитуды на стационарное сдвиговое течение.

В качестве иллюстрации рассмотрим данные для ударопрочного полистирола УП-С-0704Л, представленные на рис. 5.32 и 5.33. На рис. 5.32 изображены кривые течения $\tau_s(\dot{\gamma})$ и зависимости τ_s от максимумов $\tau_m(\dot{\gamma})$ в режиме $\dot{\gamma} = \text{const}$. На рис. 5.33 показано отмеченное выше характерное убывание времен релаксации с увеличением скорости сдвига, а также влияние $\dot{\gamma}_m(\dot{\gamma})$ — абсцисс точек максимума на зависимость $\tau(t)$. На этом рисунке под θ понимается время, в течение которого напряжение сдвига падает в e раз, а $\dot{\gamma}_m = t_m \dot{\gamma}$. Как известно, на реогониометре Вайссенберга не удастся получить указанные зависимости при $\dot{\gamma} \geq 10 \text{ с}^{-1}$; это удалось сделать на капиллярном виброреометре, работавшем в данном случае в интервале $10^2 < \dot{\gamma} < 10^5 \text{ с}^{-1}$ как капиллярный вискозиметр.

Зависимости $\theta(\dot{\gamma})$ показывают, что в области скоростей сдвига $10^2 < \dot{\gamma} < 10^5 \text{ с}^{-1}$, реализуемых обычно при литье под давлением, времена релаксации падают настолько резко, что при наложении на материал низких частот (около 1—10 Гц) можно пренебречь изменениями релаксационной природы и считать материал нелинейно вязким; единственной реологической характеристикой его в данном случае является кривая течения $\dot{\gamma}(\tau)$, аппроксимируемая, например, формулой (5.43).

Возникает вопрос: в чем же тогда природа низкочастотного вибровоздействия? Ответ на этот вопрос дает рис. 5.34. Если на нелинейную зависимость $\dot{\gamma}(\tau)$, подобную представленной на рис. 5.34, наложить колебания вида $\tau = \tau_0 + \tau_a \sin \omega t$, то из-за

нелинейной зависимости $\gamma(\tau)$ возникает несимметричный цикл колебаний $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 + \dot{\gamma}_1(t)$, так что $\int_0^{2\pi} \dot{\gamma}_1(t) dt = 0$. При этом $\dot{\gamma}_0 > \dot{\gamma}'$, т. е. средняя величина скорости деформации $\dot{\gamma}_0$ больше, чем величина $\dot{\gamma}'$ (постоянная составляющая скорости деформации), соответствующая средней величине напряжения τ_0 . Таким образом, в основе принципа вибровоздействия лежит принцип нелинейного усиления. Очевидно, что чем больше нелинейность зависимости $\gamma(\tau)$, т. е. чем более псевдопластические свойства отражает кривая течения, тем больше эффект вибровоздействия. Для расплавов термопластов, псевдопластичность которых увеличивается с ростом скорости сдвига $\dot{\gamma}$, эффект вибровоздействия, следовательно, возрастает с увеличением скоростей переработки.

Другая причина эффективности вибровоздействия при течении полимерных расплавов заключается в эффекте тиксотропии, присущем в большей степени наполненным полимерным системам, в которых увеличение интенсивности воздействия на полимер способствует разрушению структуры с ее медленным последующим восстановлением. Эффект тиксотропии приводит, в частности, к тому, что локализованное в пространстве вибровоздействие на полимерный материал может дать незатухающий эффект в области, простирающейся на большое расстояние вдоль потока.

Как следует из рис. 5.34, аналогичного эффекта можно достичь увеличением стационарной величины давления без вибрации. Таким образом, вопрос о предпочтительности применения вибровоздействия для увеличения расхода перед увеличением перепада давления для этой же цели требует специального рассмотрения.

Как будет показано ниже, наиболее целесообразным является способ создания вибровоздействия за счет объемной упругости полимерных расплавов, где, как известно, в области низких частот диссипативные потери пренебрежимо малы и можно использовать аппроксимационное равновесное уравнение объемного состояния вида

$$p = p_0 = k \frac{p - p_0}{p_0} = k \varepsilon_v; \quad \varepsilon_v = \frac{v_0 - v}{v} \quad (5.44)$$

где k — объемный модуль сжимаемости; p и p_0 — давление в деформированном и недеформированном состояниях соответственно; p и p_0 — плотность в тех же состояниях.

Использование объемной сжимаемости полимерных материалов позволяет в принципе с весьма малыми энергозатратами создавать колебания давления большой амплитуды, что повышает эффективность вибровоздействия.

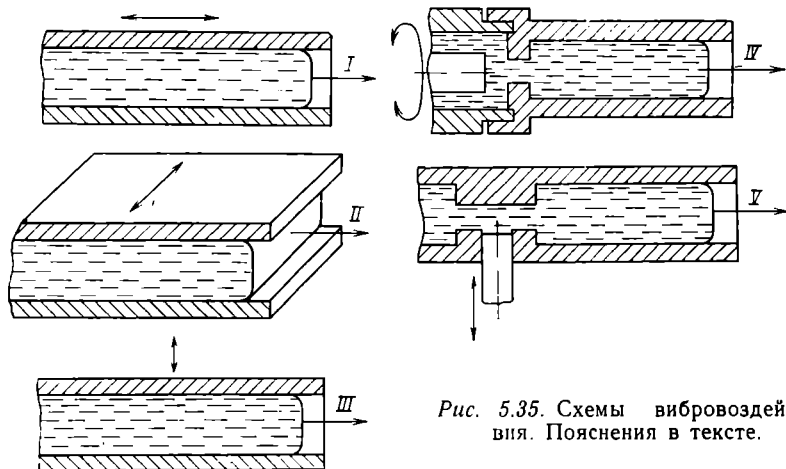


Рис. 5.35. Схемы вибровоздействия. Пояснения в тексте.

Схемы вибровоздействия (рис. 5.35). В случае одномерного течения формируемого расплава вибрации оформляющих поверхностей могут быть направлены либо параллельно вектору скорости потока (схема I), либо перпендикулярно ему (схемы II, III); другие направления маловероятны в связи с усложнением конструкции виброустройства. При вибровоздействии по схемам I и II в потоке полимера возбуждаются сдвиговые колебания, а по схеме III — продольные колебания.

Если поток полимера в полости формирующего инструмента не одномерный, то любое вибровоздействие в этих условиях можно рассматривать как различные комбинации схем I, II и III; при этом эффективность вибровоздействия будет зависеть от угла между вектором суммарной скорости потока и направлением вибровоздействия.

Интенсифицирующее влияние вибровоздействия по схеме I на процесс течения расплавов полимеров в полости пресс-инструмента достаточно хорошо изучено. Снижение вязкоупругих характеристик расплавов полимеров при периодическом сдвиговом деформировании носит тиксотропный характер. При этом отрезок времени, в течение которого вязкоупругие характеристики восстанавливаются после прекращения периодического деформирования свои значения до исходных, исчисляется минутами, а иногда часами и даже днями [167]. Если времена тиксотропного восстановления столь велики, то нет необходимости прикладывать вибровоздействие на стадии формования и непосредственно в оформляющей полости, а можно сделать это заблаговременно за пределами формирующей зоны, например в специальном копильнике, расположенном перед входом расплава в пресс-инструмент. В данном случае в качестве копильника удобно использовать устройство, состоящее из двух коаксиально расположенных цилиндров. В зазоре между ними мо-

жет одновременно находиться достаточно большое количество расплава, а за счет круговых колебаний одной из поверхностей легко создать в расплаве однородное поле интенсивных периодических сдвиговых деформаций (рис. 5.35, схема IV).

Если времена тиксотропного восстановления вязкоупругих свойств расплава исчисляются секундами и долями секунд, то применять вибровоздействие следует обязательно в полости формирования. Это можно сделать, во-первых, при помощи расположенного в зоне формирования или за ее пределами специального виброэлемента (например, вибропоршня), который возбуждает в расплаве продольные волны, распространяющиеся в направлении течения формируемого потока (рис. 5.35, схема V), и, во-вторых, за счет вибрации самих оформляющих поверхностей. Видоизмененный вариант вибровоздействия по схеме V исследован в работах [168, 169].

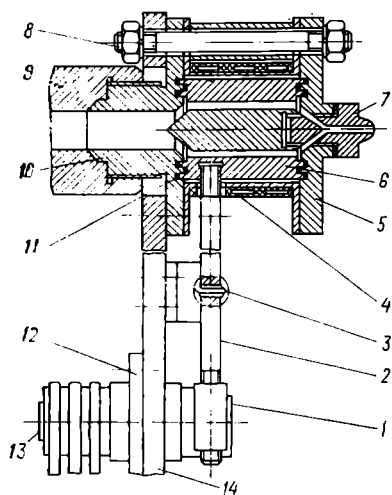


Рис. 5.36. Конструкция виброприставки, позволяющая реализовать на литейной машине режим виброформования по схемам II и IV (см. рис. 5.35):

1 — кулачок; 2 — коромысло; 3 — пружина; 4 — электронагреватель; 5 — фланец; 6 — втулка; 7 — сопло; 8 — шпилька; 9 — инжекционный цилиндр литейной машины; 10 — корпус-дори; 11 — фторопластовая прокладка; 12 — подшпипник; 13 — вал; 14 — плита.

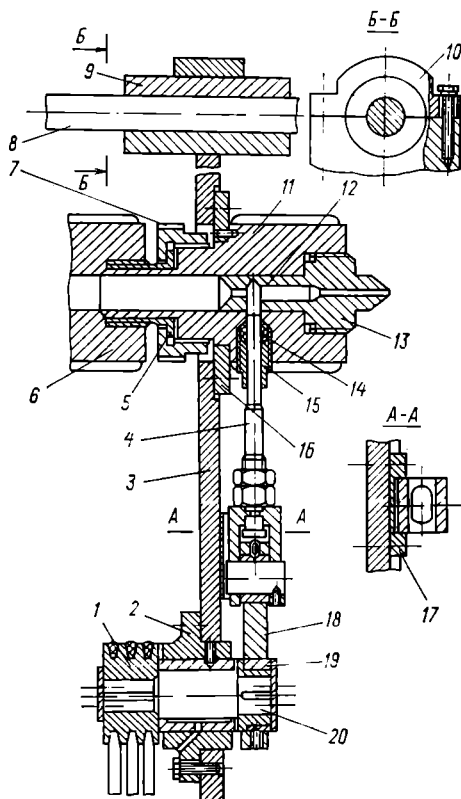


Рис. 5.37. Конструкция виброприставки, позволяющая реализовать на литейной машине виброформование по схеме V (см. рис. 5.35):

1 — шкив; 2 — ступица; 3 — плита; 4 — вибропоршень; 5 — резьбовая втулка; 6 — цилиндр пластикации; 7 — гайка накидная; 8 — колонна; 9 — втулка разрезная; 10 — хомут; 11 — корпус виброкамеры; 12 — полая втулка; 13 — сопло; 14 — уплотнение; 15 — втулка нажимная; 16 — фланец; 17 — направляющая; 18 — кривошип; 19 — эксцентриковая втулка; 20 — вал.

Приложение сдвигового вибровоздействия в сопловой части нагревательного цилиндра (см. рис. 5.35, схема IV). Возможности данного способа приложения вибровоздействия исследовались на установке, созданной на базе литевой машины (рис. 5.36).

На двух колоннах литевой машины при помощи разрезных втулок и хомутов устанавливается неподвижная плита 14. К этой плите крепится кулачковый вибратор и копильник и вибрирующее сопло, которое присоединяется к плите с помощью шести шпилек 8 и, кроме того, ввинчивается на резьбе в инжекционный цилиндр 9 литевой машины.

Сопло состоит из фланца 5, корпуса-дорна 10 и вибрационной втулки 6, которой сообщаются круговые колебания от кулачкового вибратора и сопла 7. Герметизация подвижного соединения втулки 6 с фланцем и корпусом-дорном обеспечивается лабиринтным уплотнением с фторопластовыми кольцевыми прокладками 11. Обогрев копильника осуществляется электронагревателями 4, размещенными в катушке. Между неподвижной катушкой и вибрирующей втулкой предусмотрен небольшой зазор (0,005 м), через который тепло от обогревателей может достаточно эффективно передаваться деталям копильника. Катушка является также распорным элементом между фланцем и корпусом-дорном, поэтому высоту катушки следует выбирать такой, чтобы она обеспечивала необходимое поджатие уплотнительных колец.

Кулачковый вибратор состоит из кулачка 1, замыкающей пружины 3 и коромысла 2, жестко связанного с вибрирующей втулкой 6, выполняющей роль шарнира. Привод вибратора осуществляется от электродвигателя через клиноременную передачу. Вал 13, на который насажены кулачок и шкив клиноременной передачи, установлен в подшипниках качения 12.

Вибратор укомплектован набором кулачков и шкивов, позволяющих получать колебания с угловой амплитудой 0,015—0,05 рад. и частотой 6—34 Гц. Набор втулок позволяет изменять толщину цилиндрического зазора в полости копильника от 0,001 до 0,003 м, при этом амплитуда сдвиговой деформации в зазоре будет изменяться от 200 до 25%.

Серия опытов в режиме свободного шприцевания и в режиме литевого формования показала, что за счет сдвигового вибровоздействия, прикладываемого вне полости формования (в копильнике), мало удается повысить скорость экструдирования или длину затекания полимера в полость литевой формы.

Приложение продольного вибровоздействия, направленного вдоль формирующего потока, при помощи вибропоршня, установленного перед входом в формирующую полость (см. рис. 5.35, схема V). Этот способ вибровоздействия исследовался также на литевой машине, оборудованной специальной вибропоршневой приставкой (рис. 5.37).

Вибропоршневая приставка состоит из эксцентрикового генератора колебаний, установленного на плате 3, и виброкамеры, где при помощи виброплунжера в расплаве возбуждаются продольные колебания.

Плита 3 жестко закреплена на двух колоннах 8 литевой машины с помощью разрезных втулок 9 и хомутов 10. К плите шестью болтами прикреплен фланец 16 корпуса виброкамеры 11. Корпус 11, кроме того жестко связан посредством накидной гайки 7 и резьбовой втулки 5 с корпусом пластикационного цилиндра 6 литевой машины. В корпусе виброкамеры имеется центральный канал, являющийся продолжением полости пластикационного цилиндра, и боковое отверстие, в котором по направляющей бронзовой втулке 15 перемещается вибропоршень 4. Вибропоршень уплотняется фторопластовым кольцом 14, поджимаемым втулкой 15.

В центральное отверстие виброкамеры вставлена полая втулка 12, поджимаемая к корпусу 11 соплом 13. Полая втулка имеет отверстие, через которое полость пластикационного цилиндра соединяется с полостью вибропоршня и каналом мундштука.

В ступице 2 установлен вал 20 эксцентрикового вибратора, приводимого в действие электродвигателем через клиноременную передачу. На вал насажен шкив 1 и эксцентриковая втулка 19, сообщающая через кривошип 18 вибропоршню 4 возвратно-поступательное перемещение. Для предотвращения перекоса вибропоршня использовались бронзовые направляющие салазки 17.

На описанной выше установке исследовалось, как влияет вибровоздействие, прикладываемое при помощи вибропоршня, на объемный расход полимера при свободном шприцевании через канал мундштука и на длину затекания полимера в литевые формы, имеющие оформляющие полости в виде диска и прямоугольной пластины.

Опыты проводились при частотах 6—54 Гц и амплитудах перемещения вибропоршня 0,0005—0,008 м. Давление формования p , оцениваемое по показаниям образцового манометра, установленного в гидросистеме машины, задавалось от 8 до 72 МПа, а температура расплава T — от 453 до 533 К.

Ниже дается сравнение объемного расхода полиэтилена 20908-040 при шприцевании через круглый канал диаметром 0,004 м и длиной 0,08 м в условиях вибровоздействия ($<Q_1>$) и без наложения вибрации (Q_0) ($f=10$ Гц, $H=0,008$ м, $T=453$ К):

	p , МПа					
	10	14	18	22	26	28
$\langle Q_1 \rangle$, см ³ /с	0,33	1,03	2,20	3,62	5,03	6,80
Q_0 , см ³ /с	0,16	0,31	0,98	2,08	3,51	5,22

Ниже приводится сопоставление радиусов затекания расплава полиэтилена 20908-040 в форму с оформляющей полостью в виде диска при литье в вибрационном ($\langle R_1 \rangle$) и обычном (R_0) режимах (толщина формующего зазора 0,003 м, $T=453$ К, $f=10$ Гц, $H=0,008$ м):

	p, МПа					
	10	14	18	22	26	30
$\langle R_1 \rangle$, м	0,012	0,021	0,036	0,042	0,052	0,063
R_0 , м	—	0,009	0,012	0,021	0,032	0,042

За счет вибровоздействия, прикладываемого поршнем на входе в формующую полость пресс-инструмента, можно добиться 2—3-кратного повышения скорости экструдирования и в 1,5—2 раза увеличить длину затекания полимера в оформляющую полость литьевой формы.

Таким образом, исследования показали, что приложение вибровоздействия при помощи осциллирующего поршня, установленного на входе в оформляющую полость, позволяет повысить формующую способность литьевого оборудования в значительно большей степени, чем это возможно сделать при сообщении вибраций тангенциального направления непосредственно оформляющим поверхностям (см. рис. 5.35, схемы I, II).

Однако поршневой способ вибровоздействия по эффективности несколько уступает варианту, в котором при вибрации оформляющих поверхностей периодически изменяется высота всего формующего зазора (схема III). Помимо конструктивной сложности данный вариант вибровоздействия отличается использованием очень мощного вибратора, так как осциллирующим поверхностям приходится постоянно преодолевать распорное усилие пресс-инструмента, которое при литье под давлением составляет, как правило, 10^3 — 10^5 Н.

Как уже отмечалось, применение схемы IV целесообразно только для материалов с явно выраженными тиксотропными свойствами.

Поршневой способ вибровоздействия (схема V) отличается конструктивной простотой и универсальностью: оборудовав любую действующую литьевую машину вибропоршневой приставкой, можно, не изменяя конструкции основного технологического оборудования и формующего инструмента, вести формование практически любого литьевого изделия в вибрационном режиме.

Анализ технологических и энергосиловых параметров вибрационного и обычного методов литья. С целью получения данных для сравнительного анализа технологических и энергосиловых параметров процесса литья была использована установка, представленная на

рис. 5.37, и методика проведения эксперимента, описанная в работе [170].

В ходе экспериментов, проводимых в обычном и вибрационном режимах формования, замерялись длины затекания полимера в полость формы (при литье) и средневременной объемный расход формируемого расплава (при экструзии через канал мундштука), регистрировались температурные изменения в полости вибровоздействия и на выходе из канала мундштука, а также записывались на киноплёнке осциллограммы давления на входе в формирующий инструмент и графики перемещения фронта полимерного потока в полости формы.

Характерные экспериментальные результаты представлены на рис. 5.38. Как видно из рисунка, в процессе литьевого и экструзионного виброформования на входе в пресс-инструмент возбуждаются периодические импульсы давления, при этом скорость течения формируемого полимера также совершает колебания, сдвинутые по фазе относительно осциллограмм давления. Амплитуды колебаний давления формования и скорости течения полимера, а также сдвиг по фазе между ними зависят от амплитуды перемещения вибропоршня, частоты периодического воздействия и других конструктивно-технологических параметров процесса. В указанной выше серии экспериментов амплитуда колебаний давления достигала 18 МПа, а амплитуда сдвиговой скорости потока — 10^4 с^{-1} .

Чтобы выяснить энергетическую целесообразность увеличения длины затекания полимера в форму за счет использования вибровоздействия по сравнению с достижением того же результата посредством повышения давления, необходимо подсчитать работу внешних сил, затрачиваемую при заполнении формирующего канала полимерным расплавом в обычном и вибрационном режимах литьевого формования на одинаковую, предельную для данных технологических параметров, длину.

Работа внешних сил за весь период заполнения канала расплавом подсчитывается по формуле

$$A = \int_1^{t_2} N(t) dt = \int_1^{t_2} Q(t) p(t) dt \quad (5.45)$$

где A — работа внешних сил по заполнению формы; $N(t)$ — мгновенная мощность; $Q(t)$ — мгновенная объемная скорость формируемого потока; $p(t)$ — мгновенное давление на входе в форму; t_1 и t_2 — начальный и конечный моменты заполнения формы.

Функции, фигурирующие в этой формуле, были определены в описанных ранее экспериментах (см., например, рис. 5.38). Расчеты, проведенные по (5.45) с использованием этих экспериментальных данных, показали, что работа внешних сил, затраченная на заполнение формы в вибрационном режиме, в 1,5—1,7 раза меньше, чем при традиционном режиме литья.

Чтобы выяснить, не является ли этот энергетический выиг-

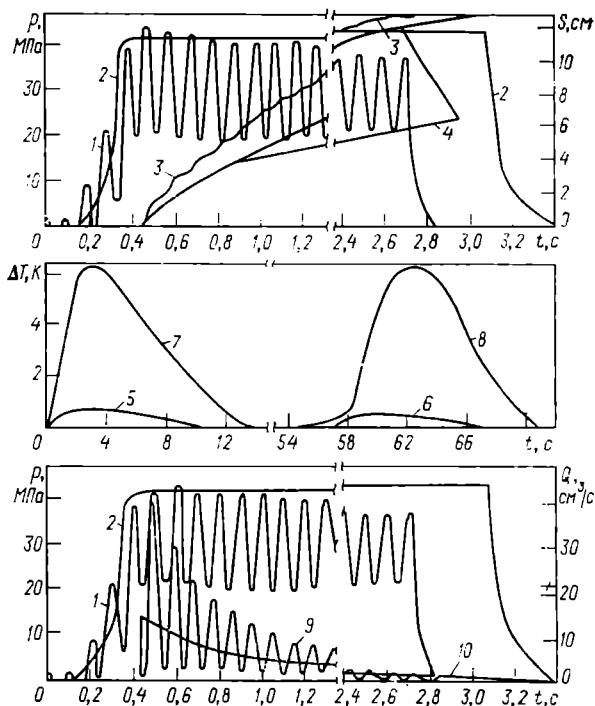


Рис. 5.38. Типичные осциллограммы давления p в полости виброприставки (1, 2); графики перемещения S (3, 4) и объемного расхода Q (9, 10); кривые изменения температуры ΔT в зоне вибровоздействия (5, 6) и в мундштуке (7, 8) при работе установки в обычном (2, 4, 6, 8, 10) и вибрационном (1, 3, 5, 7, 9) режимах литья.

рыш следствием снижения вязкости за счет дополнительных диссипативных тепловыделений при вибровоздействии, обратимся к опытным данным по изменению температуры расплава в зоне вибровоздействия (кривые 5 и 6 на рис. 5.38) и на выходе из области наибольших сдвиговых деформаций (кривые 7 и 8). Как видно из рисунка, при литье обычным методом за счет диссипативных тепловыделений в канале, связывающем полость вибровоздействия с инжекционным цилиндром, температура расплава повышается на 0,8 К, а на выходе из сопла — 6,5 К. При формовании в вибрационном режиме прирост температуры снижает вязкость расплава не более чем на 1—2%. Следовательно, энергетический выигрыш не связан с понижением вязкости за счет повышения температуры, а обусловлен, по всей вероятности, снижением вязкости расплава от вибровоздействия.

Для сравнительной оценки общих энергозатрат, расходуемых на формование одного изделия в вибрационном режиме и при обычном литье с повышенной температурой расплава,

необходимо в обоих сравниваемых режимах подсчитать как работу внешних сил, затраченную на заполнение формующего канала, так и тепловые затраты на расплавление полимера и доведение его до заданной температуры. Тепловые затраты q можно подсчитать по формуле:

$$q = \frac{M}{K_T} \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT \quad (5.46)$$

где M — масса отливки; K_T — термический к. п. д. установки; $c(T)$ — удельная теплоемкость, зависящая от температуры расплава; T_1 и T_2 — температура исходного сырья и конечная температура расплава в нагревательном цилиндре соответственно.

Принимая $K_T \approx 0,5$ и считая, что функция $c(T)$ для исследуемых материалов соответствует данным [86], рассчитали общие затраты на формование равных по длине изделий в вибрационном режиме и в обычном режиме литья при температуре, повышенной на 20 К. Расчеты показали, что общие энерг. затраты на формование одного изделия в вибрационном режиме на 15—18% меньше, чем при литье традиционным методом в условиях повышенной температуры.

Сравнительный анализ качества изделий, полученных в равноценных по формующей способности режимах литья. Визуальное сравнение отливок, полученных обычным и вибрационным методами, показало, что при формовании в условиях вибровоздействия на поверхности изделий наблюдается ряд слабо заметных регулярных полос, расположенных перпендикулярно направлению течения. С повышением частоты вибровоздействия и температуры расплава эти полосы становятся менее заметными, а при достаточно больших значениях указанных параметров практически исчезают.

Основным критерием качества литевых изделий, достаточно надежно характеризующим величину внутренних напряжений, степень анизотропии и теплостойкость, является относительная усадка при нагревании изделия на 40—50 К выше температуры стеклования (для аморфного полимера) или на несколько градусов выше температуры плавления (для кристаллического полимера). Сравнительная оценка усадочных явлений проводилась на литевых изделиях различной конфигурации, отформованных в обычном и вибрационном режимах (сравнивались отливки одинаковой длины).

На рис. 5.39 представлены результаты определения относительной усадки стержневых образцов из ударопрочного полистирола после выдержки в термостате с силиконовым маслом в течение двух часов при $T = 453$ К. Из рисунка видно, что изделия, отлитые в вибрационном режиме, имеют меньшую степень ориентации (меньшую усадку), чем равные им по длине

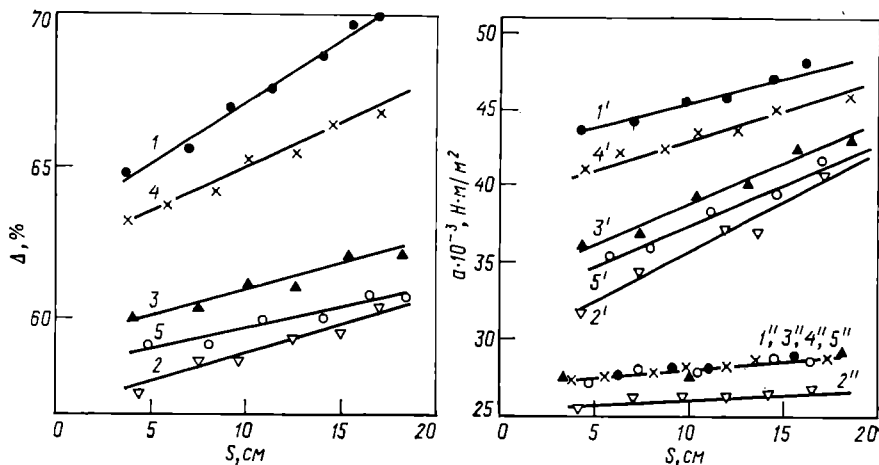


Рис. 5.39. Зависимость продольной высокоэластической усадки Δ (1—5); продольной (1'—5') и поперечной (1''—5'') ударной вязкости a образцов из УА-С-0704Л от длины отливки S . Значения T , f и H :

1, 1', 1'' — 513 К (без вибровоздействия); 2, 2', 2'' — 533 К (без вибровоздействия); 3, 3', 3'' — 513 К; 6 Гц; 0,004 м; 4, 4', 4'' — 513 К; 17 Гц; 0,004 м; 5, 5', 5'' — 513 К; 6 Гц; 0,008 м.

отливки, отформованные в традиционном режиме при той же температуре. С ростом частоты и уменьшением амплитуды вибрации степень ориентации изделий, отлитых в вибрационном режиме, увеличивается. Степень ориентации изделий, отлитых без вибровоздействия, но при повышенной температуре (на 90 К), несколько меньше, чем у отформованных в условиях вибровоздействия при первоначальной температуре. Снижение степени ориентации изделий, отформованных при вибровоздействии и при повышении температуры, обусловлено снижением вязкости расплава, в результате чего интенсифицируется процесс релаксации ориентационных напряжений.

Там же представлены результаты измерения ударной вязкости ударопрочного полистирола в стержневых образцах перпендикулярно и параллельно направлению течения (на расстоянии 0,03 м от впуска). Характер зависимости ударной вязкости, замеренной перпендикулярно направлению течения, от параметров процесса формования идентичен зависимости степени ориентации от тех же параметров: наибольшую прочность имеют образцы, отлитые при низкой температуре и высоком давлении, а наименьшую — при высокой температуре и низком давлении. У образцов, отлитых в вибрационном режиме, ударная прочность в направлении, перпендикулярном течению, ниже, чем у образцов, отформованных обычным способом при той же температуре; при этом с ростом частоты и уменьшением амплитуды прочность в данном направлении увеличивается. Ударная вязкость, замеренная в направлении течения, у отли-

вок равной длины, отформованных в обычном и вибрационном режимах литья, примерно одинакова. С ростом температуры эта характеристика изделий снижается, что связано, вероятно, с усилением термодеструкции материала.

Общая ударная прочность изделий, отлитых из ударопрочного полистирола, зависит не столько от абсолютной величины ударной вязкости в одном направлении, сколько от разности значений этой характеристики в направлениях, параллельном и перпендикулярном вектору течения; поэтому режим литья, обеспечивающий наименьшую анизотропию свойств изделий при наибольшей прочности, следует считать наиболее желательным. Вибрационный режим формования с этой точки зрения является оптимальным.

Кристаллические полимерные материалы вследствие сильного уменьшения объема при кристаллизации обладают очень широким интервалом усадки. Кроме того, этим материалам свойственна значительная анизотропия усадки, отрицательно влияющая на правильность формы и стабильность размеров отливаемых изделий. Поэтому важнейшим качественным критерием при формовании изделий из кристаллических полимеров является коэффициент анизотропии усадки K_a , который равен отношению продольной (в направлении течения) и поперечной (в направлении, перпендикулярном течению) усадки. В работе [171] показано, что на образцах, отлитых в форме с полостью в виде прямоугольного сектора, удобно определять: по отклонению угла секторной отливки от 90° — разность продольной и поперечной усадки, а по сокращению радиуса — абсолютную величину продольной усадки.

В опытах, проведенных на ПЭВП, определялась продольная усадка и степень анизотропии секторных образцов с радиусом 0,05 м и толщиной 0,002 м. Углы секторов и радиусы замерялись через 48 ч после формования. Углы определялись специальным угломером, в комплект которого входил измерительный микроскоп МИИ2 со степенью увеличения $24\times$.

На рис. 5.40 представлены результаты определения продольной усадки Δ' и K_a коэффициента анизотропии усадки образцов, отформованных в режимах с равной длиной

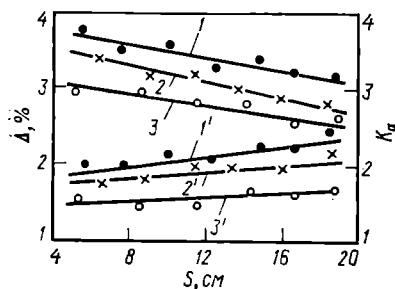


Рис. 5.40. Зависимость продольной усадки Δ (1—3) и коэффициента анизотропии усадки K_a (1'—3') образцов из полиэтилена марки 20908-040 от радиуса отливки S . Значения T , f и H :

1, 1' — 493 К (без вибровоздействия); 2, 2' — 453 К (без вибровоздействия); 3, 3' — 453 К; 10 Гц; 0,008 м.

затекания при $T=473$ К (обычным и вибрационным методом) и при $T=503$ К (обычным методом). Как видно из рисунка, наименьшую степень анизотропии усадки имеют образцы, отформованные в вибрационном режиме, а наибольшую — в высокотемпературном. Следовательно, и с точки зрения анизотропии усадки вибрационный режим формования является предпочтительным.

Гидродинамический анализ процессов литьевого виброформования. Эффективность метода литьевого виброформования (вибропоршневого метода) во многом определяется характером распространения продольных волн вдоль формируемого потока. Действительно, если длина формирующей зоны пресс-инструмента значительно превосходит глубину эффективного проникновения колебаний в расплав полимера, движущегося вдоль этой зоны, то все преимущества вибрационного режима формования практически исчезают.

Таким образом, для понимания сущности процессов, протекающих при виброформовании в полостях пресс-инструмента, и расчета предельной длины формирующей зоны необходимо рассмотреть задачу о распространении продольных колебаний в потоке нерелаксирующей нелинейно-вязкой среды, обладающей линейной объемной упругостью, а также выяснить характер воздействия этих колебаний на процесс течения подобных сред. Применительно к литью под давлением эти задачи надо рассматривать в условиях заполнения расплавом полимера оформляющей полости формы, температура стенок которой существенно ниже температуры фазового перехода расплава в твердое состояние.

Продольные волны, распространяющиеся при виброформовании в расплаве полимера, определенным образом действуют на процесс его течения в полостях литьевого формирующего инструмента. Осредненная по заданному сечению мгновенная объемная скорость потока полимера в прямоугольном канале может быть определена по формуле

$$Q = \frac{\alpha \omega h^{n+2}}{3 \cdot 2^{n+1}} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^n \operatorname{sign} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (5.47)$$

при подстановке туда значения $\partial p / \partial x$ в интересующем нас сечении. Если известны волновые параметры α и β , то давление в сечении с координатой $x = x_0$ рассчитывается по уравнению

$$p = p_0 \frac{l_0 - x}{l_0} + p_a \frac{\operatorname{sh}(\alpha l_0 - \alpha x)}{\operatorname{sh} \alpha l_0} \sin(\omega t - \beta x) \quad (5.48)$$

Продифференцировав (5.48) по x и подставив полученное выражение в (5.47), с учетом того, что $p_a/p_0 = c$, получим:

$$Q = \frac{\alpha \omega h^{n+2} p_a^n}{3 \cdot 2^{n+1} l^n} A_0^n \operatorname{sign} A_0$$

$$A_0 = -\frac{1}{c} - \frac{\alpha l \operatorname{sh}(\alpha l - \alpha x_0)}{\operatorname{sh} \alpha l} \sin(\omega t - \beta x_0) - \frac{\beta l \operatorname{sh}(\alpha l - \alpha x_0)}{\operatorname{sh} \alpha l} \cos(\omega t - \beta x_0) \quad (5.49)$$

Из приведенных выражений следует, что в общем случае амплитуда колебаний градиента давления и размах колебаний объемного расхода уменьшается с ростом x_0 , достигая при $x=0$ максимального значения, а при $x_0=l$ — минимального. С практической точки зрения важно знать расход полимера в сечении $x_0=l$, так как применительно к литью под давлением эта величина характеризует мгновенную скорость заполнения формы.

Для количественной оценки интенсифицирующего воздействия продольных колебаний на процесс течения полимера в полостях литьевых форм может быть использована величина относительного среднеинтегрального расхода $\langle Q \rangle / Q_0$, где $\langle Q \rangle$ — среднеинтегральный за цикл колебаний объемный расход полимера в сечении $x_0=l$ при формовании в вибрационном режиме, а Q_0 — объемный расход в том же сечении при обычном режиме литья или экструзии.

Величины $\langle Q \rangle$ и Q_0 в канале прямоугольного сечения рассчитываются по следующим выражениям:

$$\langle Q \rangle = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} Q dt = \frac{\omega a \omega h^{n+2} p_a^n}{2\pi \cdot 3 \cdot 2^{n+1} l^n} \int_0^{2\pi/\omega} A_s^n \operatorname{sign} A_s dt \quad (5.50)$$

$$Q_0 = -\frac{a \omega h^{n+1}}{3 \cdot 2^{n+1}} \cdot \frac{p_0^n}{l^n} \quad (5.51)$$

Правомерность использования выражения (5.50) для случая заполнения канала, когда $l=l(t)$, может быть обоснована тем, что изменение текущей длины затекания в пределах одного периода колебаний обычно пренебрежимо мало по сравнению с общей длиной потока.

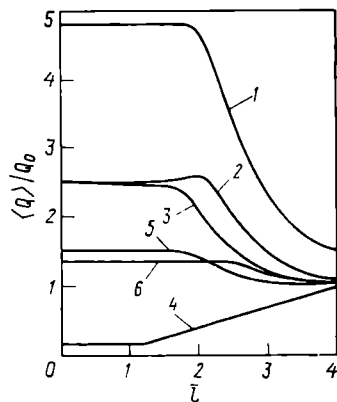
Разделив (5.50) на (5.51), получим для некоторых целочисленных значений n следующие выражения:

$$\begin{aligned} n=1 \quad S = \frac{\langle Q \rangle}{Q_0} &= 1 \\ n=2 \quad S = \frac{\langle Q \rangle}{Q_0} &= 1 + \frac{c}{2} \frac{\alpha^2 l^2}{\operatorname{sh}^2 \alpha l} \\ n=3 \quad S = \frac{\langle Q \rangle}{Q_0} &= 1 + \frac{3c}{2} \frac{\alpha^2 l^2}{\operatorname{sh}^2 \alpha l} \end{aligned} \quad (5.52)$$

Результаты расчетов, проведенных по формуле (5.52) с использованием данных [167], представлены на рис. 5.41.

Все кривые на графике имеют горизонтальный участок, соответствующий среднеинтегральному расходу при отсутствии

Рис. 5.41. Зависимость относительного расхода $\langle Q_1 \rangle / Q_0$ (кривая 1); $\langle Q_1 \rangle / Q_0$ (кривая 2); $\langle \bar{Q} \rangle / Q_0$ (кривые 3, 5, 6), где $\langle \bar{Q} \rangle = \langle Q_1 \rangle + \langle Q_2 \rangle$, и $\langle Q_2 \rangle / Q_0$ (кривая 4) от относительной длины отливки $\bar{l}$. Значения n и c соответственно: 1—4—3; 1; 5—2; 1; 6—3; 0,5.



затухания, и участок довольно быстрого убывания S вследствие роста α . Длина горизонтального участка от n и c зависит несущественно и имеет протяженность около 1,5 $\bar{l}$, а значение S на указанном участке существенно увеличивается с ростом n и c .

Чтобы оценить влияние несимметрии цикла колебаний давления, которое возникает при распространении продольных колебаний в нелинейно-вязких средах, на процесс течения полимера в прямоугольном канале, необходимо рассмотреть данный процесс отдельно в пределах каждого полупериода колебаний.

Среднеинтегральный объемный расход полимера в пределах первого $\langle Q_1 \rangle$ и второго $\langle Q_2 \rangle$ полупериодов может быть рассчитан из выражения (5.49), осредненного при $x_0 = l$ на участке от 0 до π/ω и от π/ω до $2\pi/\omega$. Разделив $\langle Q_1 \rangle$ и $\langle Q_2 \rangle$ на Q_0 , получим для рассматриваемых целочисленных n следующие зависимости:

$$\begin{aligned} n=1; \quad S_1 &= \frac{\langle Q_1 \rangle}{Q_0} = 1; \quad S_2 = \frac{\langle Q_2 \rangle}{Q_0} = 1 \\ S_1 &= \frac{\langle Q_1 \rangle}{Q_0} = 1 + \frac{4l\alpha_1 l}{\pi \operatorname{sh} \alpha_1 l} + \frac{c^2 \alpha_1^2 l^2}{2 \operatorname{sh}^2 \alpha_1 l} \\ n=2; \quad S_2 &= \frac{\langle Q_2 \rangle}{Q_0} = 1 - \frac{4c\alpha_2 l}{\pi \operatorname{sh} \alpha_2 l} + \frac{c^2 \alpha_2^2 l^2}{2 \operatorname{sh}^2 \alpha_2 l} \\ n=3; \quad S_1 &= \frac{\langle Q_1 \rangle}{Q_0} = 1 + \frac{2c\alpha_1 l}{\pi \operatorname{sh} \alpha_1 l} + \frac{3c^2 \alpha_1^2 l^2}{2 \operatorname{sh}^2 \alpha_1 l} + \frac{4c^3 \alpha_1^3 l^3}{3\pi \operatorname{sh}^3 \alpha_1 l} \\ S_2 &= \frac{\langle Q_2 \rangle}{Q_0} = 1 - \frac{2c\alpha_2 l}{\pi \operatorname{sh} \alpha_2 l} + \frac{3c^2 \alpha_2^2 l^2}{2 \operatorname{sh}^2 \alpha_2 l} - \frac{4c^3 \alpha_2^3 l^3}{3\pi \operatorname{sh}^3 \alpha_2 l} \end{aligned} \quad (5.53)$$

Из приведенных формул видно, что увеличение и уменьшение коэффициента α_2 (относительно усредненного по всему периоду коэффициента α) будет способствовать увеличению среднеинтегрального расхода за соответствующие полупериоды, в результате чего относительный расход $\bar{S} = \frac{\langle \bar{Q} \rangle}{Q_0} = \frac{\langle Q_1 \rangle + \langle Q_2 \rangle}{2Q_0}$ будет больше вычисленного ранее относительного расхода S (усредненного по периоду).

Зависимость S_1 , S_2 и $\bar{S}$ от $\bar{l}$ представлена на рис. 5.41, откуда видно, что за счет несимметричного затухания колебаний давления (заметного уменьшения амплитуды во втором полупериоде при незначительном затухании в первом полупериоде) на участке $\bar{l}=1,2 \div 2,1$ наблюдается некоторое увеличение $\bar{S}$, в то время как S уменьшается. Следствием этого является увеличение на 25—30% (до $l \approx 2$) длины зоны, в пределах которой затухание колебаний практически не уменьшает среднеинтегральный расход.

Таким образом, вибровоздействие, которое вызывает в расплаве продольные волны, направленные вдоль формируемого потока, позволяет в 2—3 раза повысить среднеинтегральную скорость течения полимера в полостях литьевых форм. Указанные результаты достижимы при виброформовании полимеров, обладающих существенной аномалией вязкости ($n \approx 2,5-3$), и при использовании литьевых форм, у которых приведенная длина формирующей зоны $\bar{l} < 2$.

Чтобы понять, каким образом продольные колебания, распространяющиеся вдоль формируемого потока, влияют на предельную длину затекания полимера в полость литьевой формы, рассмотрим кинетическую картину процесса заполнения прямоугольного канала в вибрационном режиме, начав анализ с изометрической задачи.

Согласно полученным выше результатам, процесс заполнения канала в вибрационном режиме можно условно разбить на два этапа, первый из которых реализуется при текущих приведенных длинах затекания $\bar{l} < 2$, а второй — при $\bar{l} > 2$. На первом этапе затухание колебаний практически не влияет на среднеинтегральную скорость заполнения канала полимера ($\alpha \approx 0$), а фазовый сдвиг либо отсутствует, либо имеет сравнительно небольшую величину ($\beta \approx 0$). Второй этап характеризуется тем, что затухание влияет на среднеинтегральную скорость, при этом с ростом l величины α и β довольно резко возрастают, достигая при $l \approx 3 \div 4$ максимальных значений, а относительная среднеинтегральная скорость заполнения канала, наоборот, резко падает от максимального значения, соответствующего $\alpha = 0$, до 1.

Рассмотрим сначала кинетику процесса на первом этапе заполнения канала. Мгновенная скорость заполнения прямоугольного канала при распространении в нем незатухающих колебаний может быть определена из равенства

$$\begin{aligned} \frac{dl}{dt} = \frac{m}{k} \left[-\frac{p_0}{l} + \frac{p_a}{l} \sin(\omega t - \beta l) \right]^n \operatorname{sign} \left[-\frac{p_0}{l} + \right. \\ \left. + \frac{p_a}{l} \sin(\omega t - \beta l) \right] \end{aligned} \quad (5.54)$$

Введя новую переменную $\varphi = \omega t - \beta l$, где $\beta = \beta(l)$, и произведя в выражении (5.54) замену аргумента t на φ , получим:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{dl}{d\varphi} \left(\omega - \frac{d\varphi}{dt} \right) \quad (5.55)$$

Подставляя (5.54) в (5.55), преобразуя и решая уравнение при начальном условии $l|_{\varphi=0} = 0$, найдем:

$$\bar{l} = \left[\frac{(n+1) p_a}{jk} \int_0^\varphi \left(-\frac{1}{c} - \sin \varphi \right)^n \operatorname{sign} \left(-\frac{1}{c} - \sin \varphi \right) d\varphi \right]^{\frac{1}{n+1}} \quad (5.56)$$

Для некоторых целочисленных n выражение (5.56) переписывается в виде

$$n = 1; \quad \bar{l} = \left[\frac{p_a}{k} \left(\frac{\varphi}{c} - \cos \varphi + 1 \right) \right]^{1/2} \quad (5.57)$$

$$n = 3; \quad \bar{l} = \left\{ \frac{1,33 p_a}{k} \left[\frac{\varphi}{c^3} - \frac{3}{c^2} (\cos \varphi - 1) + \frac{34}{2} - \frac{3 \sin^2 \varphi}{4c} - \cos \varphi + 1 - \frac{1}{3} (\cos^3 \varphi - 1) \right] \right\}^{1/4}$$

Выражения (5.57) описывают процесс перемещения фронта потока формируемого полимера при заполнении прямоугольного канала в вибрационном режиме при $l \leq 1$ и $\bar{l} < 2$.

Обратимся теперь к анализу данного процесса при текущих длинах затекания $\bar{l} > 2$. Мгновенная скорость заполнения кана-

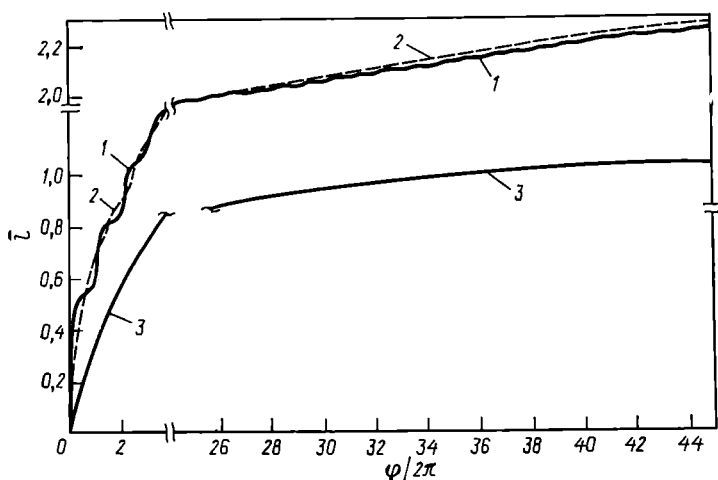


Рис. 5.42. Графики перемещения фронта потока ($n=3$; $c=1$; $p_a/k=0,02$):
1 — $p = p_0 + p_a \sin \varphi$; 2 — $p = p^*(\alpha=0)$; 3 — $p = p_0$.

ла в этом случае запишется в виде

$$\frac{d\bar{l}}{dt} = \frac{mp_a^n}{kl^n k} \left[-\frac{1}{c} - \frac{\alpha l}{\text{sh } \alpha l} \sin(\omega t - \beta l) \right]^n \text{sign} \left[-\frac{1}{c} \times \right. \\ \left. \times \frac{\alpha c}{\text{sh } \alpha l} \sin(\omega t - \beta l) \right] \quad (5.58)$$

Преобразуя (5.58), имеем:

$$\frac{d\bar{l}}{dt} = \frac{p_a}{\dot{\gamma} l^n k} \left(-\frac{1}{c} - \frac{\alpha l}{\text{sh } \alpha l} \sin \varphi \right)^n \text{sign} \left(-\frac{1}{c} - \frac{\alpha l}{\text{sh } \alpha l} \sin \varphi \right) \quad (5.59)$$

Если выражение (5.59) проинтегрировать по φ в пределах первого и второго полупериодов, пренебрегая при этом изменением $\bar{l}$ за время полупериода, а полученное равенство проинтегрировать по $\bar{l}$ от $\bar{l}_1$ до $\bar{l}_2$ ($\bar{l}_1$ и $\bar{l}_2$ — приведенные длины затекания полимера в начале и в конце рассматриваемого полупериода), то для рассматриваемых целочисленных n получим следующие выражения:

$$n = 1; \quad \int_{\bar{l}_1}^{\bar{l}_2} \frac{\bar{l} d\bar{l}}{\frac{1}{c} + \frac{\alpha \bar{l}}{\pi \text{sh } \alpha \bar{l}}} = \frac{\pi p_a}{2k}; \quad \begin{array}{l} 0 - \pi/\omega \rightarrow \alpha = \alpha_1 (+) \\ \pi/\omega - 2\pi/\omega \rightarrow \alpha = \alpha_2 (-) \end{array} \quad (5.60)$$

$$n = 3; \quad \int_{\bar{l}_1}^{\bar{l}_2} \frac{\bar{l} d\bar{l}}{\frac{1}{c^3} \pm \frac{G\alpha \bar{l}}{c^2 \pi \text{sh } \alpha \bar{l}} + \frac{3\alpha^2 \bar{l}^2}{2c \text{sh } \alpha \bar{l}} \pm \frac{2\alpha^2 \bar{l}^3}{\pi \text{sh}^3 \alpha \bar{l}}} = \frac{\pi p_a}{3k}$$

Используя выражения (5.57) и (5.60), можно рассчитать графики перемещения фронта потока при изотермическом заполнении прямоугольного канала расплавом полимера в вибрационном режиме на любую заданную длину. Рассчитанные по данным формулам кривые $\bar{l}(\varphi)$ на длине затекания, охватывающей обе рассматриваемые области течения (т. е. при $\bar{l} < 2$ и $\bar{l} > 2$), представлены на рис. 5.42.

На этом рисунке кроме графиков, описывающих процесс заполнения канала в вибрационном режиме, представлены кривые $\bar{l}(\varphi)$, иллюстрирующие процесс заполнения данного канала в обычном, квазистационарном режиме при давлениях на входе в полость $p = p_0$ и $p = p^*$, где p_0 — постоянная составляющая давления при заполнении канала в условиях вибровоздействия, а p^* — давление формования, при котором мгновенная скорость заполнения полости формы при любом $\bar{l}$ соответствует среднеинтегральной скорости перемещения фронта потока на рассматриваемом участке в условиях заполнения канала в вибрационном режиме.

Чтобы определить p^* , следует приравнять выражения, по которым рассчитывались среднеинтегральные расходы во фрон-

те потока при заполнении прямоугольного канала в вибрационном режиме (5.57) и мгновенный расход при обычном, квазистационарном режиме заполнения (5.51); в результате получим следующее равенство:

$$p^* = \left\{ \int_0^{2\pi} \left(p_0 + \frac{p_a \alpha l}{\text{sh } \alpha l} \sin \varphi \right)^n d\varphi \right\}^{1/n} \quad (5.61)$$

Отсюда для ряда целочисленных n имеем:

$$\begin{aligned} n = 1; & \quad p^* = p_0 \\ n = 2; & \quad p^* = \left(p_0^2 + \frac{3\alpha^2 l^2 p_0 p_a^2}{2 \text{sh}^2 \alpha l} \right)^{1/2} \\ n = 3; & \quad p^* = \left(p_0^3 + \frac{3\alpha^2 l^2 p_0 p_a^2}{2 \text{sh}^2 \alpha l} \right)^{1/3} \end{aligned} \quad (5.62)$$

Из выражений (5.61) и (5.62) следует, что p^* не постоянно по длине течения: данное давление можно считать неизменным при $\bar{l} < 2$, а за пределами этой зоны с ростом $\bar{l}$ величина p^* уменьшается, достигая при достаточно больших длинах затекания значения p_0 . Однако, если допустить, что давление p^* при $\bar{l} > 2$ неизменно по длине течения и равно значению этой величины при $\bar{l} < 2$, то кривая $\bar{l}(\varphi)$ даже при весьма больших длинах затекания будет несущественно отклоняться от аналогичной кривой, рассчитанной для p^* , изменяющегося согласно (5.61). Отсюда следует, что давление p^* можно считать неизменным по длине течения и определять, предполагая, что $\frac{\alpha l}{\text{sh } \alpha l} \approx 1$, т. е.

$$\begin{aligned} n = 1; & \quad p^* = p_0 \\ n = 2; & \quad p^* = p_0 \sqrt{1 + c^2/2} \\ n = 3; & \quad p^* = p_0 \sqrt{1 + 3/2c^2} \end{aligned} \quad (5.63)$$

Из сопоставления кривых $\bar{l}(\varphi)$, рассчитанных для вибрационного режима заполнения канала и для квазистационарного режима при $p = p^*$, видно, что максимальные отклонения первой кривой от второй, за исключением сравнительно небольшой области заполнения вначале, весьма малы по сравнению с текущей длиной затекания (не более 3—5% от $\bar{l}$). Следовательно, для определения текущей длины затекания полимера в заданный момент времени при вибрационном режиме заполнения полости формирующего канала с точностью, вполне допустимой для инженерных расчетов, можно использовать зависимости $\bar{l}(\varphi)$, полученные в квазистационарном режиме при $p = p^*$, считая при этом $\varphi \approx \omega t$ (так как $\omega t \gg \beta l$).

Для количественной оценки эффекта увеличения текущих длин затекания, обусловленного вибровоздействием, сопоставим кривые $\bar{l}(\varphi)$, рассчитанные для вибрационного режима и

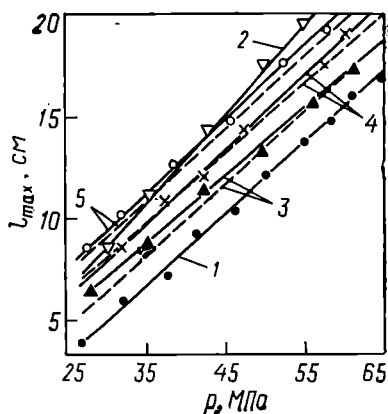
для квазистационарного при $p=p_0$. Как видно из рис. 5.42, абсолютная разность текущих длин затекания в двух сравниваемых режимах с ростом $\bar{l}$ увеличивается, однако уже при $\bar{l} > 2 \div 2,5$ этот прирост становится весьма незначительным по сравнению с общей длиной течения, поэтому можно считать, что за пределами указанной области $\bar{l}$ приложение вибровоздействия малоэффективно. Относительный эффект увеличения текущих длин затекания в области $\bar{l} < 2$ при $n=3$ и $c=1$, когда среднеинтегральная скорость заполнения формы в вибрационном режиме в 2,5 раза превосходит мгновенную скорость стационарного заполнения при $p=p^*$, составляет 30—35%.

Анализ экспериментальных кривых $l(t)$ и $p(t)$, полученных в неизотермических условиях, показал, что на некотором начальном участке заполнения канала они весьма мало отличаются от аналогичных кривых, зарегистрированных в изотермическом режиме заполнения канала при прочих равных условиях. С ростом длины затекания сравниваемые кривые начинают несколько различаться: амплитуда колебаний давления при неизотермическом течении убывает по длине потока быстрее, чем при изотермическом режиме, а темп перемещения фронта потока в неизотермических условиях по сравнению с изотермическими становится более медленным; при некотором значении $l_{\max}$ течение прекращается, в то время как при изотермическом режиме длина затекания не имеет предела. Участок течения, в пределах которого неизотермические и изотермические кривые $l(t)$ и $p(t)$ незначительно отличаются друг от друга, составляет, как правило, 70—80% от $l_{\max}$.

Подобная же кинематическая картина наблюдается и при сопоставлении квазистационарных неизотермических и изотермических режимов заполнения канала.

Согласно [173], отмеченные выше факты можно объяснить следующим образом. На начальной стадии неизотермического заполнения степень охлаждения расплава невелика, поэтому характеры неизотермического и изотермического течения близки. Однако по мере заполнения полости степень охлаждения расплава увеличивается, при этом возрастает среднемассовая вязкость потока J (у аморфных полимеров) или толщина не участвующего в движении застывшего слоя h_0 (у кристаллических полимеров). Увеличение J и h_0 способствует уменьшению скорости течения формируемого расплава, а при определенной длине затекания $l_{\max}$, когда среднемассовая вязкость потока аморфного полимера будет в 2,5—3 раза превосходить начальное ее значение или граница застывшего слоя кристаллического полимера дойдет до центра потока, движение материала прекратится. Расчеты показали [173, 174], что участок, в пределах которого при квазистационарном неизотермическом режиме течения J и h_0 слабо изменяются по длине потока, составляет обычно 70% от $l_{\max}$.

Рис. 5.43. Зависимость предельной длины затекания расплава УП-С-0704Л от давления литья; $h=0,002$ м; $\omega=0,035$ м; $T=513$ К (кривая 1, 3–5); $T=533$ К (кривая 5). Значения f и H : 1, 2 — без вибровоздействия; 3 — 6 Гц; 0,004 м; 4 — 17 Гц; 0,004 м; 5 — 6 Гц; 0,008 м; — — — эксперимент; — — — — — расчетные данные.



Итак, если при неизотермическом вибрационном режиме течения основная часть формирующего канала заполняется в условиях, близких к изотермическим, то для количественной оценки некоторых параметров данного неизотермического процесса можно использовать аналитические зависимости, выявленные при исследовании соответствующего изотермического процесса. Например, для оценки предельно допустимой длины формирующей полости литьевой формы l_0 ($l_0=2/\alpha_\infty$), можно, очевидно, с приемлемой степенью достоверности использовать формулы, полученные при анализе изотермического процесса распространения продольных волн.

Как было показано выше, для определения текущей длины затекания при заполнении канала в изотермическом вибрационном режиме можно с достаточной точностью использовать кривые $l(t)$, полученные в условиях стационарного заполнения при $p=p^*$ [величина p^* рассчитывается по (5.63)].

Показано [173, 174], что при неизотермическом заполнении канала в квазистационарном режиме диссипативные выделения тепла практически не оказывают воздействия на процесс течения полимера. Учитывая это, можно считать, что диссипативные тепловыделения при неизотермическом заполнении канала в вибрационном режиме также заметным образом не влияют на процесс течения полимера, а температурные режимы процессов вибрационного и квазистационарного (при $p=p^*$) заполнения практически идентичны.

Следовательно, для количественной оценки текущей и предельной длины затекания полимера в полость формирующего канала при неизотермическом вибрационном режиме течения можно использовать зависимости $l(t)$ и $l_{\max}(t)$, полученные в квазистационарном неизотермическом режиме при $p=p^*$. Справедливость данной корреляции подтверждается экспериментальными данными, представленными на рис. 5.43.

5.4.3. Заполнение формы реактопластами

Процесс заполнения оформляющей полости литьевой формы расплавом термореактивного материала имеет существенные отличия от описанного в разд. 5.4.1 процесса заполнения формы термопластами. Это обусловлено прежде всего различиями

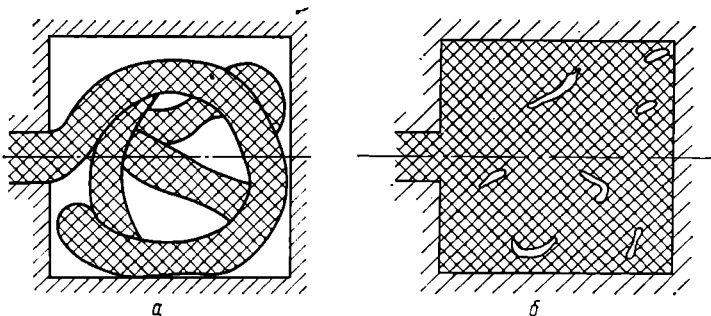


Рис. 5.44. Последовательные фазы процесса заполнения оформляющей полости формы в струйном режиме. Пояснения в тексте.

реологических свойств этих материалов, определяющими сущность деформационных и тепловых процессов при движении материалов по литниковой системе и оформляющей полости формы.

При литье реактопластов наблюдаются два принципиально различных режима заполнения формы: струйный и регулярный. Струйный режим заполнения возникает при литье толстостенных, массивных изделий. В этом случае размеры впускного отверстия литникового канала намного меньше характерного поперечного размера полости формы. Регулярный режим возникает при литье относительно тонкостенных изделий, когда расстояние между противоположными стенками полости формы соизмеримо с размерами впускного канала [175].

Реальная конфигурация литьевых изделий обуславливает неодинаковый характер процесса заполнения различных частей одного и того же изделия. Так, струйный режим заполнения толстостенных элементов отливки может переходить в регулярный при входе расплава в узкие участки полости формы и наоборот. Таким образом, эти режимы заполнения могут рассматриваться как крайние случаи из всего многообразия режимов литья [176, 177]. Очевидно, что все прочие режимы могут быть проанализированы как промежуточные с помощью метода суперпозиции этих режимов.

Струйный режим заполнения. Для этого режима характерно наличие двух стадий (рис. 5.44). На первой стадии (рис. 5.44, а) выходящая из впускного канала струя расплава, имеющая площадь поперечного сечения, близкую к площади поперечного сечения впускного канала, достигает тупиковых, наиболее удаленных участков формы, не встречая при своем движении заметного сопротивления стенок полости формы. После этого начинается хаотическая укладка струи во всем объеме полости формы без существенной деформации конфигурации ее поперечного сечения. В соответствии с этим работа деформации на первой стадии невелика и в полости формы на протя-

жении этой стадии эффективное давление $p_0 \approx 0$. Кинетика процесса заполнения на этой стадии полностью контролируется гидравлическим сопротивлением литниковой системы и пластичного цилиндра литейной машины. Первая стадия проходит, как правило, в режиме постоянного давления литья и постоянной объемной скорости впрыска.

При достижении некоторой, достаточно плотной степени укладки струи начинается вторая стадия этапа заполнения, которая сопровождается сдвиговыми деформациями струи и, как следствие этого, увеличением давления в расплаве. Процесс заполнения на этой стадии заключается в уплотнении отдельных струй до практически полной ликвидации пустот в оформляющей полости (рис. 5.44, б). На второй стадии заполнения кинетика процесса определяется не только гидравлическим сопротивлением системы, предшествующей оформляющей полости, но и реологическим поведением деформируемых струй расплава.

Ввиду малой продолжительности заполнения в этом режиме процесс можно считать изотермическим и протекающим при условии

$$T_m < T_c$$

где T_m — температура материала, поступающего в форму; T_c — температура стенки формы.

Степень завершенности процесса, т. е. степень заполнения, можно характеризовать в данном случае отношением объема впрыснутого расплава реактопласта к объему полости формы (α) или отношением объема воздушных включений в массе расплава, содержащейся в объеме полости, к объему полости (β). Если принять, что уплотняющая струя расплава с воздушными включениями представляет собой единую пористую структуру, то скорость процесса заполнения, определяемую кинетикой процесса удаления пористости, можно представить как $d\beta/dt$. Процесс заполнения можно считать пространственно однородным, т. е. не зависящим от координат точек оформляющей полости, и давление $p_0(t)$, развиваемое в полости в ходе ее заполнения, также однородно по пространству полости. Протекание первой стадии заполнения будет продолжаться до достижения пористости $\beta = \beta^*$, соответствующей плотной упаковке с большим количеством точек контакта между отдельными струями. Значение β^* можно оценить теоретически, анализируя некоторые идеализированные схемы укладки цилиндрических тел. Наибольшая плотность упаковки достигается на схеме, представленной на рис. 5.45, а. Значение β^* для этой ромбической упаковки равно $1 - \pi/2\sqrt{3} = 0,0925$. Наименьшая плотность упаковки отвечает схеме прямоугольной укладки (рис. 5.45, б), для которой значение β^* равно $1 - \pi/4 = 0,215$ [175]. Вследствие хаотичности реальной укладки струй значения пористости β^* ,

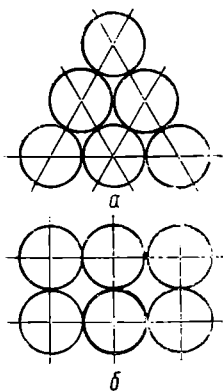


Рис. 5.45. Различные идеализированные схемы упаковок цилиндрических тел:

а — ромбическая; б — прямоугольная.

соответствующие переходу от первой стадии процесса ко второй, находятся, вероятно, в интервале 0,1—0,2. Более достоверно значение β^* может быть определено экспериментальным путем.

В связи с тем, что процесс струйного заполнения проходит на первом этапе в режиме постоянной скорости впрыска, уравнение, описывающее этот этап, при условии несжимаемости расплава будет иметь вид

$$Q = -v \frac{d\beta}{dt} \quad (5.64)$$

где Q — объемный расход расплава; v — объем полости формы.

Рассмотрим теперь вторую стадию заполнения, когда укладка струи уже завершена и начинается уплотнение расплава. Пусть емкость объема v с температурой стенки T_c заполняется расплавом композиции с температурой T_m через литниковую систему из резервуара под постоянным давлением p_n (рис. 5.46). Предположим, что воздушные включения сообщаются между собой или условно вакуумированы.

Уравнение кинетики процесса уплотнения пористой системы представляет собой, очевидно, функциональную связь между изменением пористости β во времени t и параметрами процесса уплотнения: давлением в полости p и вязкостью расплава μ . Используя функцию

$$p = f\left(\beta, \frac{d\beta}{dt}, \mu\right)$$

на основании анализа размерности [178] можно установить соотношение, которое записывается в виде

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{-\beta p_0}{\mu \psi(\beta)} \quad (5.65)$$

где $\psi(\beta) > 0$ удовлетворяет естественному физическому условию $\psi(\beta) \rightarrow \psi_0 = 0$ при $\beta \rightarrow 0$. Знак минус в уравнении (5.65)

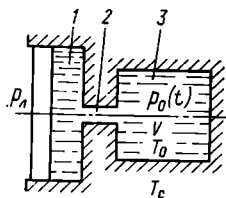


Рис. 5.46. Схема процесса заполнения формы в струйном режиме:

1 — сопловая часть литейной машины; 2 — литниковый канал; 3 — формующая полость формы.

соответствует естественному ограничению решения этого уравнения.

Уравнение (5.65) было получено на основании размерностных соотношений, что является достаточным доказательством его справедливости, но численное значение коэффициента $\psi(\beta)$, входящего в это уравнение, из размерного анализа установить трудно. Поэтому было признано целесообразным рассмотреть поведение в процессе уплотнения некоторых идеализированных ячеечных систем, чтобы в дальнейшем сравнить уравнения кинетики уплотнения, полученные в результате подобного рассмотрения, с уравнениями (5.65). Подобный анализ [175] показал идентичность указанных зависимостей и позволил установить, что с точностью, достаточной для практических целей, можно принять

$$\psi(\beta) \approx \psi_0 \approx 1,15$$

Поведение расплавов реактопластов даже при очень малых скоростях деформаций, имеющих место в процессе уплотнения, значительно отличается от ньютоновского и в случае простого сдвига достаточно хорошо описывается степенным законом [22] [см. (5.27)]:

$$\tau = m(T) \dot{\gamma}^n$$

где $m(T) = m_0 \exp(E/RT)$.

Учитывая изотермичность процесса, можно считать, что

$$m(T) = m(T_0) = \text{const} = m$$

Скорость сдвига $\dot{\gamma}$ в процессе деформирования, сопровождающегося изменением пористости, можно оценить выражением вида

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{1-\beta} \frac{d\beta}{dt} \quad (5.66)$$

Тогда с учетом (5.66) выражение (5.65) принимает вид

$$-\frac{d\beta}{dt} = \left[\frac{\beta p_0}{\psi_0 m (1-\beta)^{1-n}} \right]^{1/n} \quad (5.67)$$

В рассматриваемом случае однородного заполнения все переменные величины, входящие в уравнение (5.67), оказываются зависимыми от t , в частности давление в оформляющей полости $p_0 = p_0(t)$. Это давление необходимо связать с внешним фактором (машинным параметром) — давлением литья $p_{\text{л}}$. Давление p_0 может быть существенно меньше последнего, так как оно связано со значительными потерями давления при впрыске за счет взаимодействия материала со стенками нагревательного сосуда и с потерями давления в сопловой части и в литниках. Установление связи между величинами $p_{\text{л}}$ и p_0 и объемным рас-

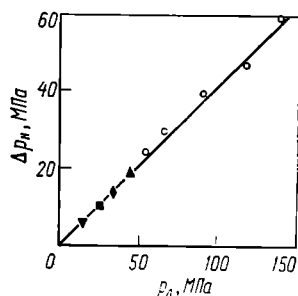
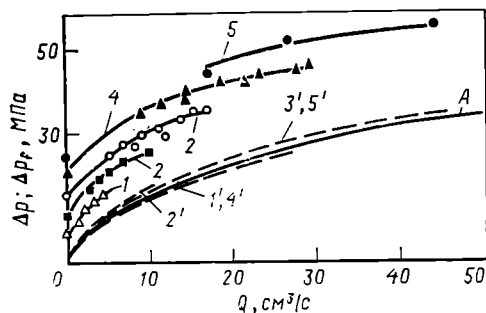


Рис. 5.47. Зависимость перепадов давления Δp (кривые 1—5) и Δp_f (кривые 1'—5') от объемного расхода Q фенопласта 03-010-02 при 373 К в системе, предшествующей оформляющей полости формы; А — обобщенная кривая.

Рис. 5.48. Зависимость составляющей потерь давления Δp_n от давления $p_{\text{л}}$ для фенопласта 03-010-02.

ходом материала через единую систему «узел пластфикации — литниковая система» является необходимым для составления аналитического описания процесса заполнения формы. Ввиду значительного разнообразия конструкций систем, предшествующих оформляющей полости формы, и сложности гидравлического и теплового взаимодействия материала со стенками цилиндра, сопла и литников, теоретическое определение искомой зависимости, называемой «сило-скоростной характеристикой», затруднено. В работе [176] эта характеристика определена экспериментально по следующей методике.

Опыты по установлению зависимости $\Delta p = f(Q, p_{\text{л}})$, где $\Delta p = p_{\text{л}} - p_0$, проводились на узле пластфикации и впрыска червяк-плунжерного типа при заранее установленных значениях давления, литья $p_{\text{л}}$ и постоянных параметрах процесса пластфикации. При установлении на выходе из сопла всевозможных насадок с разными гидравлическими сопротивлениями при постоянном значении расхода смеси получали значение Q при различных Δp . Установка была снабжена устройством для замера давления расплава при выходе из сопла. Как следует из графиков, приведенных на рис. 5.47, потери давления Δp зависят от давления $p_{\text{л}}$, причем имеется некоторая величина потерь давления Δp_n при «нулевом» расходе, определяемая разностью величин $p_{\text{л}}$ и p_0 в момент прихода червяка в крайнее переднее положение. Была установлена зависимость величины Δp_n от $p_{\text{л}}$ в виде (рис. 5.48)

$$\Delta p_n = \omega p_{\text{л}}; \quad \omega = \text{const} \quad (5.68)$$

Оказалось, что составляющая потеря Δp_n связана только с сухим трением материала о стенку цилиндра в зоне загрузки и смещения червячного пластикатора.

При вычитании величины Δp_n из общих потерь давления для каждого устанавливаемого p_n было получено, что все зависимости $\Delta p_f = \Delta p - \Delta p_n = f(Q)$ вполне удовлетворительно укладываются на обобщенную кривую A , описываемую уравнением вида

$$Q = k_f (\Delta p_f)^n f \quad (5.69)$$

После установления природы потерь давления Δp_n вполне естественно предположить, что потери давления Δp_f связаны с течением расплава через сопло и литниковую систему. На справедливость подобного предположения указывает установленная экспериментальным путем [22] идентичность значений показателя степени в уравнении (5.69) и показателя степени реологического закона пристенного движения расплава $1/s$. Таким образом, уравнение (5.69) является уравнением сило-скоростной характеристики системы, предшествующей оформляющей полости формы, которое может быть записано в виде

$$Q = k_f [p_n (1 - \omega) - p_0]^{1/s} \quad (5.70)$$

Система уравнений (5.64) и (5.70) является математическим описанием первой стадии процесса заполнения формы в струйном режиме. Рассматривая режим заполнения при фиксированном давлении литья $p_n = \text{const}$ и при $p_0(t) = 0$, получим выражение для времени t , определяющего достижение пористости β :

$$-v \frac{d\beta}{dt} = k_f [p_n (1 - \omega)]^{1/s} \quad (5.71)$$

Решая уравнение при условии $\beta(0) = 1$; $0 \leq t \leq t^*$, получаем:

$$t^* = v (1 - \beta^*) \{k_f [p_n (1 - \omega) - 1]\}^{1/s} \quad (5.72)$$

Рассмотрим теперь решение системы уравнений (5.64), (5.67), (5.70) для второй стадии заполнения ($t > t^*$) при начальных условиях

$$\beta|_{t=t^*} = \beta^*; \quad p_0(t^*) = p_0^*$$

Значение p_0^* в общем случае не равно нулю и определяется из условия непрерывной стыковки решений для первой и второй стадий при заданном значении β^* . Данная система решалась численно на машине БЭСМ-4 относительно $p_0(t)$, β и t . Результаты расчетов представлены на рис. 5.49 совместно с результатами экспериментальной проверки полученных кинетических зависимостей. Экспериментальную проверку математического описания этапа заполнения формы проводили при заполнении расплавом фенопласта (рис. 5.49). В ходе опытов были определены сило-скоростная характеристика системы, предшествующей оформляющей полости формы, а также изменение давления и пористости расплава в ходе заполнения.

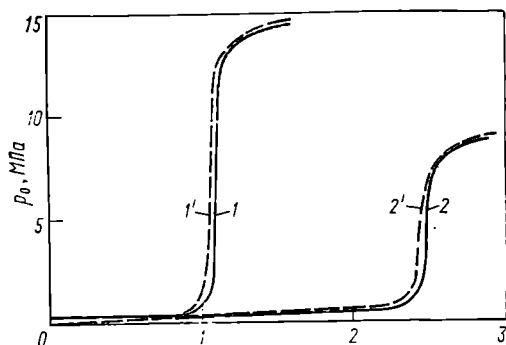


Рис. 5.49. Теоретические (1, 2) и экспериментальные (1', 2') зависимости $p_0(t)$ для композиции фенопласта 03-010-02. Температура формы 433 К; p_d равно: 1, 2 — 25 МПа; 1', 2' — 15 МПа.

Установлено, что первая стадия процесса заполнения, заканчивающаяся в момент времени t^* , соответствует достижению значения $\beta = 0,19 \div 0,21$.

Вторая стадия заполнения (см. рис. 5.49), соответствующая уплотнению композиции, в течение относительно большого промежутка времени проходит без существенного увеличения давления в полости формы. Процесс характеризуется постоянной скоростью уменьшения пористости до значений $\beta = 0,02 \div 0,03$. После достижения указанных значений давление p_0 резко возрастает, что сопровождается уменьшением скорости снижения β .

Сравнение вида экспериментальных и расчетных кривых $\beta(t)$ и $p_0(t)$ показывает, что несоответствие по времени графиков изменения давления составляет 5—7%, значения функции $\beta(t)$ отличаются при $\beta < 0,02$ немногим более чем на 8%.

Существенно, что экспериментально определенные значения оказываются гораздо меньше расчетных при $\beta < 0,02$. Причиной этого может быть собственная сжимаемость расплава, а также наличие замкнутых воздушных включений, не учитываемых в приведенной выше теории.

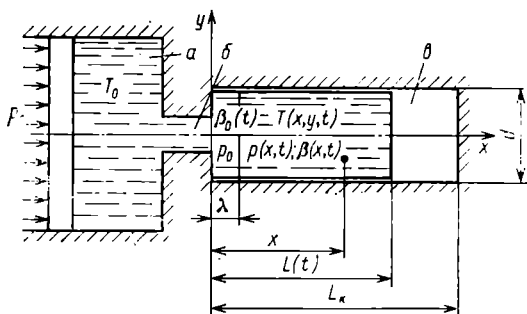
Окончание второй стадии заполнения формы может быть принято соответствующим наступлению момента времени, когда эффективная сжимаемость расплава за счет пористости становится соизмеримой со сжимаемостью монолитного расплава. Это соответствует моменту достижения пористости $\beta \approx 0,02 \div 0,05$.

Регулярный режим заполнения. По мере приближения характерного поперечного размера струи к поперечному размеру оформляющей полости струйный режим заполнения переходит в регулярный. При реализации регулярного режима заполнения наблюдаются, как и в процессе струйного заполнения, два этапа. Первый этап характеризуется движением струи материала до достижения конечных участков формы, сопровождающимся стесняющим воздействием стенок полости и, следовательно, уплотнением композиции. Формование изделий заканчивается в ходе второго этапа при дальнейшем уплотнении расплава.

На первом этапе заполнения входящая струя композиции вступает в контакт с двумя противоположными стенками оформляющей полости, тормозится и завивается в клубок, об-

Рис. 5.50. Принципиальная схема процесса заполнения полости формы в регулярном режиме:

a — сопловая часть литейной машины; b — литник; a — полость формы.



разуя в некоторой, весьма малой входовой области пористую структуру с предельной укладкой струй, соответствующей значению пористости $\beta = \beta^* = 0,2$. После этого при возникновении в зоне смешения давления начинается истечение из нее расплава с достигнутой при этом величиной β . Поток материала, имея «рваный фронт», движется до тех пор, пока не достигнет задней стенки оформляющей полости. При этом на всем протяжении длины отливки $l(t)$ в данный момент времени имеется некоторое распределение пористости $\beta(x, t)$ [где $0 \leq x \leq l(t)$] от максимальной, равной β^* на фронте потока, до минимальной $\beta_0(t)$ в зоне смешения.

Приведенная качественная картина процесса заполнения формы в регулярном режиме явилась основой для составления его аналитического описания. Принципиальная схема процесса заполнения представлена на рис. 5.50. Оформляющая полость состоит из двух пластин длиной L_k и шириной b , причем L_k связана с толщиной условием $d \ll L_k$. Движение расплава в полости предполагается одномерным, за исключением области непосредственно у впускного канала (зоны смешения с длиной λ), и направленным вдоль оси x неподвижной декартовой системы координат.

В отличие от процесса формирования термопластичных материалов, где при течении расплава в оформляющей полости наблюдается прилипание материала к стенке, процессу формирования реактопластов сопутствуют значительные скорости пристенного скольжения V_c , причем доля, вносимая в общий расход пристенным скольжением, значительно превышает долю, определяемую сдвиговым течением. Принимая во внимание этот факт, можно предположить, что течение, таким образом, контролируется уравнением вида

$$\sigma_c = m_c(T) V_c^s \quad (5.73)$$

где m_c и s — постоянные.

Это уравнение описывает свойства пристенного слоя при сдвиговом деформировании расплава реактопласта. Можно считать, что температура пристенного слоя практически мгновенно становится равной температуре формы T_c , в связи с чем можно принять, что температура указанного слоя при выходе расплава из зоны смешения мгновенно становится равной тем-

пературе стенки формы T_c . Таким образом, реологические характеристики можно относить к этой температуре. Учитывая малые характерные времена заполнения формы, приростом температуры пристенного слоя за счет диссипативных тепловыделений можно пренебречь [176].

Процесс заполнения формы в регулярном режиме вследствие значительной вязкости расплава композиций в пристенном слое и малого расстояния d можно считать ламинарным.

Основными величинами, характеризующими процесс заполнения, являются: давление в полости формы $p(x, t)$, скорость $V(x, t)$ и пористость $\beta(x, t)$, распределенные по длине отливки $0 < x < l(t)$. Найдем уравнения, описывающие связь между этими величинами.

Уравнение движения расплава при указанном выше допущении может быть представлено в виде

$$\sigma_c = - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{d}{2} \quad (5.74)$$

Учитывая, что на поверхности движущегося потока расплава находятся сообщающиеся поры, снижающие площадь поверхности контакта материала со стенкой, и что только $(1-\beta)$ -тая доля поверхности участвует в контакте со стенкой, уравнение (5.74) необходимо видоизменить с учетом (5.73) таким образом:

$$(1 - \beta) m_c V_c^s = - \frac{d}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5.75)$$

Уравнение неразрывности для данного процесса с учетом несжимаемости реактопласта может быть представлено в виде

$$- \frac{\partial \beta}{\partial t} + V_c \frac{\partial (1 + \beta)}{\partial x} = 0 \quad (5.76)$$

Для описания первой стадии процесса заполнения формы уравнение неразрывности (5.76) необходимо решать совместно с уравнением движения (5.74), уравнением кинетики уплотнения (5.67), а также уравнением, связывающим расход полимера Q с перепадом давления в системе, предшествующей оформляющей полости (5.70). Производя интегрирование уравнения (5.75) на участке $0 \leq x \leq \lambda$ при условии

$$\begin{aligned} \beta|_{x=0} &= 0; & \beta|_{x=\lambda} &= \beta_0; \\ V|_{x=0} &= \frac{Q}{bd}; & V|_{x=\lambda} &= V; & \lambda &\ll L_k \end{aligned}$$

получаем уравнение баланса массы в области смешения:

$$\beta d \left[1 - \beta_0(t) \frac{dl}{dt} \right] = k_f [p_n (1 - \omega) - p_0]^{1/2} \quad (5.77)$$

Интегрируя уравнение (5.75) в пределах

$$p|_{-\infty < x < \infty} = p(x, t); \quad p|_{x=l(t)} = 0$$

получаем распределение давления:

$$p(x, t) = \frac{2}{d} m_c [V_x(t)]^n \int_x^{l(t)} \beta_1(x, t) dx \quad (5.78)$$

Экспериментально установлено [176], что характерной особенностью процесса регулярного заполнения является сохранение любой частицей потока при ее течении в оформляющей полости значения пористости β , приобретенного в характерной зоне смешения. Практическое отсутствие уплотнения композиции после ее выхода из зоны смешения во время заполнения объясняется, видимо, большими значениями вязкости в совокупности с недостаточным (до достижения значительной степени уплотнения) давлением в оформляющей полости. Все это позволяет при количественном описании рассматриваемого процесса ввести весьма важное допущение о несжимаемости потока с непостоянной по его длине величиной β . Это дает возможность при анализе процессов, происходящих вне зоны смешения, при $\lambda < x < l(t)$, рассматривать условно зону смешения как некоторую граничную поверхность, соответствующую координате $x \approx 0$. Отсюда следует важный вывод о независимости $V_x(t) = V_c(t)$ от продольной координаты x . Очевидно, что

$$\beta[x, t(t)] = \beta_0[l(t) - x] \quad (5.79)$$

Вводя на основании (5.79) новую подвижную координату при учете условий

$$l(t) - x|_{x=l} = 0; \quad l(t) - x|_{x=0} = l; \quad d[l(t) - x] = -dx$$

и кинематического условия

$$v_x(t) = v_c(t) = \frac{d[l(t) - x]}{dt}$$

получаем выражение для давления на входе в полость формы:

$$p_0(t) = \frac{2}{d} m_c \left[\frac{dl(t)}{dt} \right]^n \int_0^t l(t) - \int_0^{l(t)} \beta_0[l(t) - x] \frac{dl(t)}{dt} dt \quad (5.80)$$

При введении безразмерных переменных

$$z = \frac{p_0(t)}{p_n(1-\omega)}; \quad \tilde{t} = \frac{[p_n(1-\omega)]^{1/n}}{\psi_0 m} t;$$

$$L = \left\{ \frac{2m_c}{p_n(1-\omega)d} \left[\frac{p_n(1-\omega)}{\psi_0 m} \right]^{\frac{s}{n}} \right\}^{\frac{1}{s+1}} l(t)$$

и безразмерного параметра

$$\tilde{k} = \frac{1}{b} \left(\frac{2}{d} \right)^{\frac{s+2}{s+1}} (m\psi_0)^{\frac{1}{n(s+1)}} [m_c(T_c)]^{\frac{1}{s}} k_f^{\frac{1}{s(s+1)}} [p_n(1-\omega)]^{\frac{n-s}{ns(1+s)}}$$

систему уравнений преобразуем к виду:

1) уравнение кинетики уплотнения в области $x=\lambda$

$$-\frac{d\beta_0}{d\tilde{t}} = \left[\frac{\beta_0 z}{(1-\beta_0)^{1-n}} \right]^{1/n} \quad (5.81)$$

2) уравнение течения пористого материала

$$\frac{z(1-\beta_0)}{1-z} = \tilde{K}^{\frac{s+1}{s}} \int_0^{\tilde{t}} (1-z)^{\frac{1}{s}} d\tilde{t} \quad (5.82)$$

3) уравнение (4.12)

$$\frac{dl}{d\tilde{t}} = \tilde{K} \left(\frac{1-z}{1-\beta_0} \right)^{1/s} \quad (5.83)$$

Систему уравнений необходимо решать при следующих начальных условиях:

$$\tilde{\gamma} = 0; \quad \tilde{L} \Big|_{\tilde{t}=0} = 0; \quad \beta_0 \Big|_{\tilde{t}=0} = \beta_* = 0,2$$

В результате решения системы уравнений (5.81) — (5.83) на ЭВМ БЭСМ-4 были получены функциональные зависимости

$$l(t); \quad v(t); \quad \rho(x) \Big|_{l(t)=L_K} \quad \text{и} \quad \beta(x) \Big|_{l(t)=L_K}$$

определяющие длительность протекания первой стадии процессов регулярного заполнения.

Как уже отмечалось, формование изделий при регулярном режиме заполнения заканчивается после реализации второй стадии процесса, т. е. уменьшения пористости по всей длине изделия при достижении фронтом конечных участков формы. При этом система предположений, приведшая к упрощенным уравнениям (5.81) — (5.83), оказывается уже неприемлемой, и для описания данной стадии заполнения необходимо использовать полные уравнения (5.67), (5.70), (5.73), (5.76) с дополни-

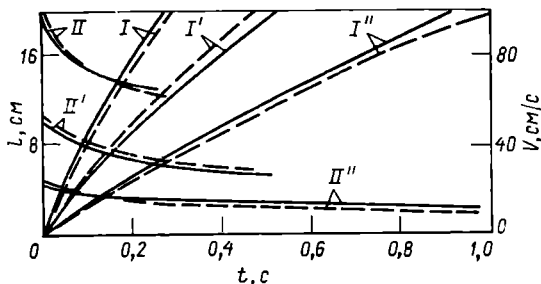
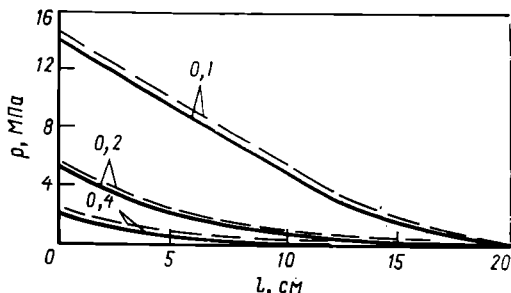


Рис. 5.51. Расчетные (—) и экспериментальные (---) зависимости $l(t)$ (кривые I, I', I'') и $V(t)$ (кривые II, II', II'') для фенопласта типа 03-010-02 при $p_0=87,6$ МПа и $T_c=433$ К. Толщины изделий:

I, II — 0,1 см; I', II' — 0,2 см; I'', II'' — 0,4 см.

Рис. 5.52. Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (пунктирные линии) зависимости $p(l)$. Цифры у кривых — толщина изделия в см, $T_c = 433$ К.



тельным краевым условием $V|_{x=L_k}=0$, что сопряжено со значительными математическими трудностями.

Однако продолжительность второй стадии процесса, очевидно, можно оценить приблизительно, используя полученное ранее аналитическое описание второй стадии струйного режима заполнения. Оказалось, что длительность протекания второй стадии в 10—20 раз меньше, чем первой [176]. В связи с этим главной составляющей общего времени процесса является продолжительность первой стадии, и определение длительности второй стадии не имеет практического смысла с точки зрения оценки его вклада в общее время цикла литья.

Продолжительность первого этапа процесса заполнения в регулярном режиме определяется временем пребывания материала в вязкотекучем состоянии. Температурно-временной режим заполнения должен исключить возможность преждевременного отверждения расплава до достижения потоком конечных участков полости формы.

Экспериментальная проверка зависимостей, полученных расчетным путем, подтвердила возможность их применения для описания процесса регулярного заполнения формы расплавом реактопласта. В качестве примера на рис. 5.51 и 5.52 приведены для сравнения зависимости $V(t)$ и $p(l)$, полученные опытным путем и методом расчета. Как видно из рисунков, между ними имеется вполне определенное соответствие [176].

С целью упрощения инженерных расчетов по данным уравнениям было выполнено их решение на ЭВМ БЭСМ во всем практически возможном интервале изменения безразмерного параметра $\tilde{K}$. Максимальное значение $\tilde{K}$ соответствовало его значению при работе с литником большого проходного сечения и относительно малой длины. Минимальное значение $\tilde{K}$ было рассчитано при условии применения распространенных на практике впускных каналов высотой 0,6—0,8 мм и шириной 4—8 мм, создающих значительное гидравлическое сопротивление потоку расплава.

При расчетах было охвачен интервал температур формы 433—553 К и температур материала 283—453 К. Давление литья было принято изменяющимся от 100 до 200 МПа, толщи-

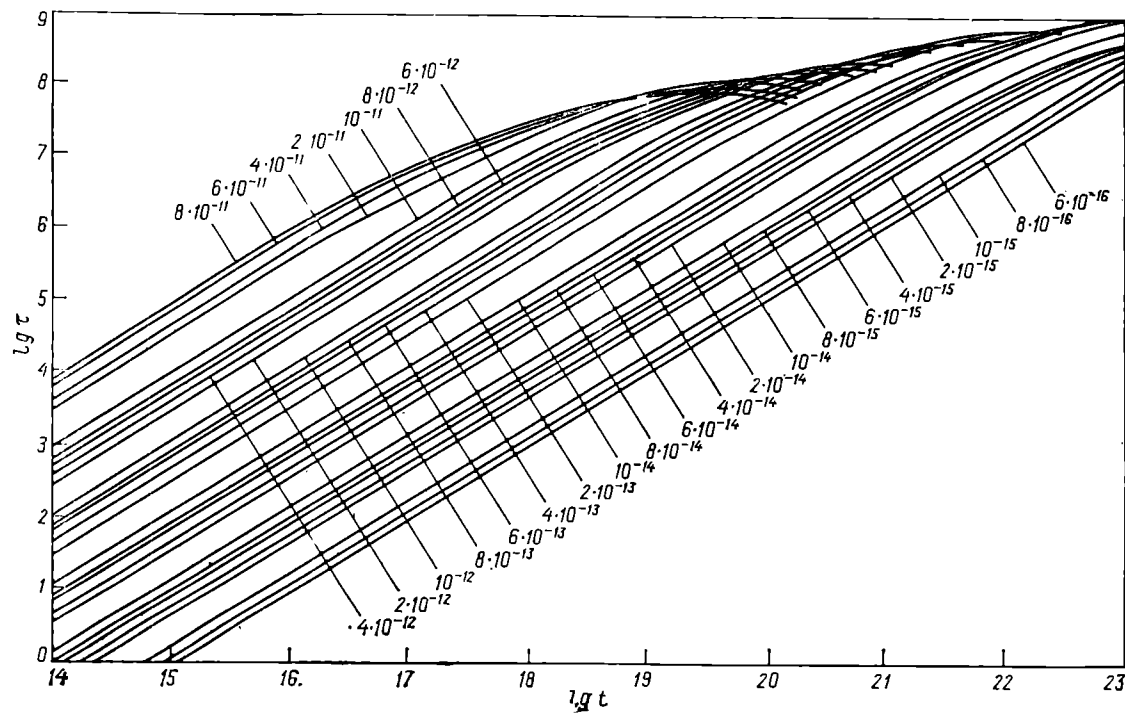


Рис. 5.53. Номограмма для расчета заполняемости литейных форм. Цифры у кривых — значение параметра $\bar{K}$.

на изделия — от 1 до 8 мм. Все расчеты выполнены для фенопласта типа 03-010-02. Результаты этого расчета представлены на рис. 5.53 в виде наиболее важной с практической точки зрения зависимости $\tilde{L}(\tilde{t})$ для различных $\tilde{K}$ (от $8 \cdot 10^{-11}$ до $8 \cdot 10^{-16}$). Зная время отверждения t^* , можно по данной номограмме с учетом конкретных факторов технологии, свойств материала и конструкции оборудования и формы найти максимально возможную длину отливки. Используя номограмму, можно рассчитать максимальное давление литья $p_{\text{л}}$.

5.5. ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ФОРМЕ НА ЭТАПАХ ВЫДЕРЖКИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ И ОТВЕРЖДЕНИЯ

Выдержка под давлением полимера в форме сопровождается притоком новых порций расплава. Вследствие этого в формующей полости происходит увеличение давления и плотности расплава. По сравнению с временем операции заполнения формы продолжительность выдержки под давлением относительно велика. В реальных условиях процесса формования изделий окончанием времени выдержки под давлением считается момент завершения процесса затвердевания (отверждения) полимера во впускных каналах формы.

Одновременно с процессом уплотнения расплава полимера в форме происходит рост его вязкости вследствие затвердевания (отверждения). В конечном итоге рост давления в полости прекращается, и в ней устанавливается максимальное его значение. Это значение определяет максимальное усилие смыкания формы и существенно влияет на физико-механические характеристики готовых изделий.

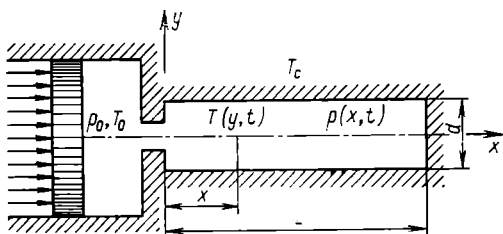
Ниже будет рассмотрена сущность процессов, протекающих в формующей полости на этапе выдержки под давлением и отверждения при литье термопластичных и термореактивных материалов, а также представлено аналитическое решение задач по определению зависимостей, связывающих параметры литья с геометрией изделий и свойствами полимера.

5.5.1. Выдержка под давлением и на отверждение при литье термопластов

В момент окончания заполнения формующей полости литьевой формы в ней устанавливается перепад давлений, характеризующийся тем, что на входе в полость давление равно p_0 (определяется установленным давлением подпитки и в течение времени выдержки под давлением изменяется незначительно), а в конце у тупиковой стенки полости $p_i \ll p_0$.

В дальнейшем вследствие объемной сжимаемости при выдержке под давлением происходит процесс выравнивания во времени давления по длине формующей полости, который при постоянных температуре формы, температуре расплава на входе в форму и давлении материала на входе в форму будет тор-

Рис. 5.54. Схема процесса уплотнения расплава в форме.



мозиться ростом вязкости термопласта. Особенностью технологического процесса формирования термопластов является то, что за-

твердевание полимера происходит при его охлаждении до температуры стеклования у аморфных и температуры кристаллизации у кристаллических полимеров. По истечении времени выдержки под давлением в полости устанавливается конечное распределение давления [179].

Процесс выравнивания давления прекращается, но затвердевание полимера еще продолжается на стадии выдержки на отверждение. При этом вследствие температурной усадки среднее давление в полости снижается.

Учитывая, что вязкость аморфного полимера растет монотонно с понижением температуры, стремясь к бесконечности при температуре стеклования T_g , а вязкость кристаллического полимера при температуре кристаллизации $T_{кр}$ претерпевает скачок, также приближаясь к бесконечности, физическая картина процесса формования данных материалов на стадии выдержки под давлением и на отверждение будет несколько различна. Соответственно отличаются методы подхода при получении количественных зависимостей, связывающих параметры литья с геометрией изделия и свойствами полимера. Рассмотрим сначала процесс формования изделий при литье аморфных полимеров.

В заполненную ранее формующую полость длиной L и толщиной d (причем $d \ll L$), имеющую температуру стенки $T_c = \text{const}$, поступает весьма малое количество расплава полимера, имеющего температуру $T_0 > T_c$ (рис. 5.54).

Ламинарное течение неньютоновской жидкости, рассматриваемое как течение между двумя параллельными пластинами (так как $d \ll L$), одновременно направлено и вдоль оси x неподвижной декартовой системы координат с центром у входа в полость, так что выполняются условия

$$V_x = V(y); \quad V_y = V_z = 0 \quad (5.84)$$

$$p_{x=0} = p_0; \quad p|_{0 < x < L} = p(x, t) \quad (5.85)$$

где p_0 — постоянное на входе в полость давление; $p(x, t)$ — уменьшающееся по длине x и возрастающее во времени t давление в полости формы.

Координата y отсчитывается от середины щели, так что

$$-d/2 \leq y \leq +d/2$$

Вследствие малых скоростей течения жидкости на исследуемом этапе конвективной составляющей и диссипативным выделением тепла в процессе теплообмена можно пренебречь. При постоянстве коэффициента температуропроводности a изменение температуры в зазоре $T(y, t)$ определяется уравнением теплопроводности вида

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (5.86)$$

Начальные и граничные условия уравнения:

$$T \Big|_{t=0} = T_0; \quad T \Big|_{y=\pm d/2} = T_c; \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (5.87)$$

Реологическое уравнение для большинства термопластичных полимеров представляется в форме

$$\tau = m_0 \exp \frac{b}{T - T_g} \dot{\gamma}^n \quad (5.88)$$

где b , m_0 , T_g , n — константы.

Уравнение движения при допущении квазистационарности режима течения и при условии пренебрежения влиянием сил инерции и собственного веса расплава принимает вид

$$\frac{\partial p}{\partial x} = - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \quad (5.89)$$

Предполагается, что перепад давления не зависит от координаты y .

Для решения задачи о выравнивании давления расплава в формующей полости система уравнений (5.86)—(5.89) должна быть дополнена уравнением неразрывности струи и уравнением состояния, характеризующим процесс сжимаемости расплава при его уплотнении.

Уравнение неразрывности имеет вид:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \bar{\rho} \bar{V} = 0 \quad (5.90)$$

Здесь $\bar{\rho}$ — средняя по сечению плотность расплава, а $\bar{V}$ — среднерасходная скорость, определяемые уравнениями

$$\bar{\rho} = \frac{2}{d} \int_0^{d/2} \rho(y) dy; \quad \bar{V} = \frac{2}{d} \int_0^{d/2} V(y) dy \quad (5.91)$$

Термопластичные материалы в вязкотекучем состоянии обладают значительной сжимаемостью.

Уравнение состояния с учетом (5.91) при условии $\partial p / \partial y \approx 0$ для большинства термопластов имеет вид

$$\bar{p} = \frac{2}{\omega d} \int_0^{d/2} \frac{p + \pi}{(p + \pi) + \frac{RT}{\omega M}} dy \quad (5.92)$$

где R — газовая постоянная; M — молекулярная масса; π , $\bar{\omega}$ — постоянные для каждого полимера.

Совместное решение уравнения движения (5.89) и реологического уравнения (5.88) определяет скорость движения расплава:

$$V = \left(\frac{1}{m_0} \right)^{\frac{1}{n}} \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \right)^{\frac{1}{n}} \int_0^{d/2} y^{\frac{1}{n}} \exp \left[-\frac{b}{n(T - T_g)} \right] dy \quad (5.93)$$

Система уравнений (5.86), (5.90) — (5.93) замкнута относительно функции $p(x, t)$. Конечное распределение давления в формирующей полости $p(x, t_*)$ определяется моментом времени t_* , при котором средняя по сечению температура расплава

$$\bar{T} = \frac{2}{d} \int_0^{d/2} T(t, y) dy$$

становится равной температуре стеклования T_g .

Соответствующие преобразования проводятся в следующей последовательности. В уравнение (5.90) вводятся (5.92) и (5.93) с учетом (5.91). Далее, проводя интегрирование по частям и соответствующие математические преобразования (при этом функция

$$f(T, p) = \frac{p + \pi}{(p + \pi) + \frac{RT}{\omega M}}$$

раскладывается в ряд и ее значение ограничивается линейным членом ряда), а также вводя безразмерные комплексы, получим окончательную систему уравнений, численное решение которой определяет искомую функцию $p(x, t_*)$.

Решение задачи ищется в виде

$$\Phi(x_1, t_1) = e^{-\lambda_0(t_1)x_1} \quad (5.94)$$

Начальные и граничные условия:

$$\Phi(t_1, x_1 = 0) = 1; \quad \Phi(x_1, t_1) = e^{-\lambda_0 x_1} \quad (5.95)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \right|_{x_1=2L/d} = 0$$

где λ_0 — константа, описывающая начальное распределение давления.

В уравнении (5.94) $\lambda(t_1)$ равно

$$\lambda(t_1) = \tilde{\theta}(t_1)^{-1} \left[\left(\frac{T_c/T_0}{\lambda_0(t_1)} \right)^{\frac{1+n}{n}} - \frac{1-n}{n} \int_0^{t_1} \frac{\tilde{\theta}(t_1)^{-\frac{2+n}{n}}}{D_1(t_1)} dt_1 + \right. \\ \left. + \frac{n+1}{2(2n+1)} \int_0^{t_1} \frac{D_2(t_1) \tilde{\theta}(t_1)^{-\frac{2+2n}{n}}}{D_1(t_1)} dt_1 \right]^{-\frac{n}{n+1}} \quad (5.96)$$

Здесь

$$D_1(t_1) = \left(\frac{4am_0^{1/n}}{q_0^{1/n}d^2} \right) \left\{ \bar{\theta}(t_1)^{1-1/n} \left[\int_0^1 y_1^{1/n} \exp \frac{-b}{nT_c[\bar{\theta}(t_1) - \theta_c]} dy \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \int_0^{y_1} \bar{\theta}(t_1) dy_1 \right]^{-1} \right\} \quad (5.97)$$

$$D_2(t_1) = \frac{q_0 M \omega}{T_c R} \left\{ \bar{\theta}(t_1) \frac{\int_0^1 y_1^{\frac{1+n}{n}} \exp \frac{-b}{nT_c[\bar{\theta}(t_1) - \theta_c]} dy_1}{\int_0^1 y_1^{1/n} \exp \frac{-b}{nT_c[\bar{\theta}(t_1) - \theta_c]} dy_1 \cdot \int_0^{y_1} \bar{\theta}(t_1) dy_1} \right\} \quad (5.98)$$

В уравнениях (5.96)–(5.98) параметр $\theta(t_1, y_1)$ определяется при решении уравнения теплопроводности (5.86). Соответственно $\bar{\theta} = \int_0^1 \theta(t_1) dy_1$.

Безразмерные параметры представлены в виде

$$\Phi = q/q_0; \quad q = p(x, t) + \pi; \quad q_0 = p_0 + \pi; \\ y = \frac{d}{2} y_1; \quad t = \frac{(d/2)^2}{a} t_1; \quad x = \frac{d}{2} x_1; \quad (5.99) \\ \theta = T(y, t)/T_c; \quad \bar{\theta} = \bar{T}(t)/T_c; \quad \theta_c = T_c/T_c$$

Конечное распределение давления в формующей полости рассчитывается при граничных условиях вида:

$$\Phi(x_1, t_1) = \Phi_*(x_1, t_{1*}), \quad \text{где} \quad t_1 \Big|_{\theta_y=0=\theta_c} = t_{1*} \quad (5.100)$$

$$\bar{\theta}(t_1) \Big|_{t_1=t_{1*}} = \bar{\theta}_*(t_{1*}) = \int_0^1 \theta(t_{1*}, y_1) dy_1$$

Экспериментальная проверка аналитического решения задачи о выравнивании давления на стадии выдержки под давлением и на отверждение проводилась при литье аморфного полимера — блочного полистирола. Исследования проводились в

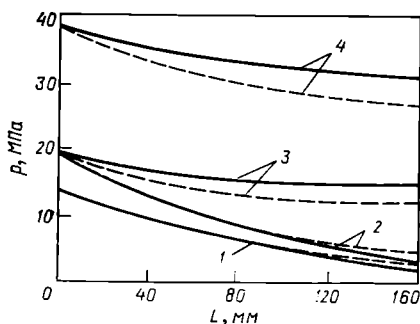


Рис. 5.55. Экспериментальное (—) и расчетное (---) распределения абсолютного давления по длине формы для четырех режимов. Соответствующие значения T_0 , p_d , p_0 , d и t_* :
 1 — 170 °C; 43,5 МПа; 12,6 МПа; 4 мм; 2,5 с; 2 — 210 °C; 34,5 МПа; 20 МПа; 2 мм; 1,5 с; 3 — 210 °C; 38,5 МПа; 20 МПа; 4 мм; 3 с; 4 — 210 °C; 62,5 МПа; 37,5 МПа; 4 мм; 3,8 с.

опытной форме при литье изделий в виде пластин размерами 155×20 мм и толщиной 2; 4 и 6 мм. Давление дожатия p_d варьировалось от 40 до 90 МПа, температура материала составляла: 443, 463, 483 К.

На рис. 5.55 представлены конечные распределения давлений в полости для ряда исследованных режимов. Показано, что конечное распределение давления прямо пропорционально температуре материала на входе в форму, давлению дожатия и толщине изделия. Составление экспериментального и расчетного распределений давления показывает, что наблюдается вполне удовлетворительное соответствие (максимальное расхождение для большинства исследованных режимов не превышает 15%).

По конечному распределению давления рассчитывается необходимое максимальное усилие запираания формы по уравнению

$$F = B_0 \int_0^L p(t_*, x) dx \quad (5.101)$$

где B — ширина щели.

Представленное выше аналитическое рассмотрение процесса уплотнения расплава в форме, основанное на том, что влияние неизотермичности процесса учитывалось в виде известной задачи об остывании плоской, первоначально равномерно нагретой плиты, удовлетворительно описывает формирование аморфных полимеров, вязкость которых монотонно растет с уменьшением температуры.

Принятые допущения при исследовании кинетики застывания изделия в форме при литье кристаллических полимеров существенно искажают картину процесса. Вместе с тем знание действительной качественной и количественной картины процесса на стадии выдержки под давлением и на охлаждение при литье изделий из данных материалов необходимо для правильного понимания условий формования различных частей изделия.

Процесс формирования изделия методом литья под давлением принято разделять на три стадии [180]. Несмотря на имеющиеся в них различия, сущность процессов, происходящих в форме, одинакова — это процесс течения расплава при переменной температуре [181, 182]. Поэтому процесс литья вообще можно охарактеризовать временной зависимостью количества расплава, попадающего в форму. Эта зависимость характеризует суммарный эффект скорости впрыска, охлаждения и степени подпитки при выдержке под давлением.

В результате экспериментов по литью изделия типа «пластина» из полиамидной смолы, где каждый отлитый образец взвешивался с точностью до 0,01 г, была получена зависимость массы расплава, поступающего в форму, от времени приложения давления (рис. 5.56). Эта зависимость показывает, что кривые группируются по длинам заполнения формы; при этом изменение давления литья мало сказывается на окончательной плотности отливок. Значительно больше оно сказывается на стадии заполнения. Здесь кривые группируются по давлению литья. Независимо от длины оформляющей полости все точки окончания заполнения (точки перегиба) при одинаковом давлении лежат на одной линии, являющейся линией заполнения. Каждую кривую можно считать состоящей из двух участков: участка заполнения и участка подпитки.

На каждой из этих стадий в форму вводится определенное количество расплава по массе. Соотношение между этими количествами колеблется в интервале $7 \div 10:1$ и зависит от режима заполнения.

Если допустить, что застывший полимер не претерпевает объемных изменений, то из анализа результатов, представленных на рис. 5.56, можно сделать вывод, что количество расплава, поступающего в форму с некоторого момента времени до полного застывания изделия, будет характеризовать количест-

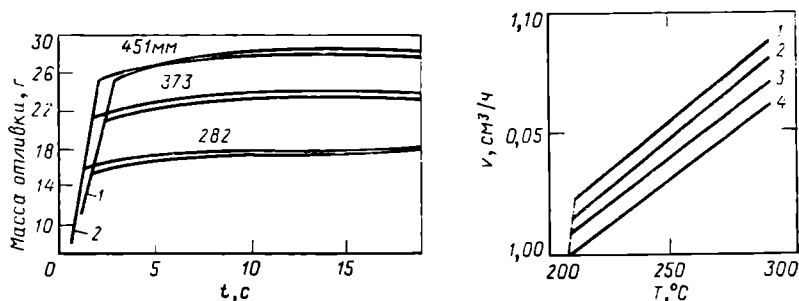


Рис. 5.56. Кинетика процесса формирования изделия типа «пластина» при давлении литья 38 МПа (1) и 44 МПа (2). Числа у кривых — длина заполнения формы.

Рис. 5.57. Зависимость удельного объема полиамида П-68 от температуры при постоянном давлении, равном:
1 — 0,7 МПа; 2 — 10; 3 — 30; 4 — 50 МПа.

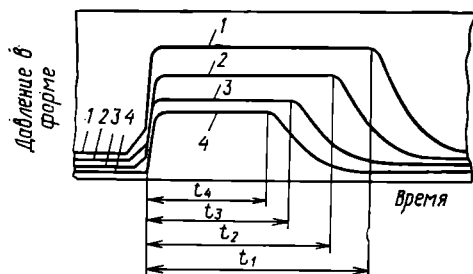


Рис. 5.58. Осциллограмма процесса формирования изделия типа «пластина» в форме. Датчик 1 расположен на входе в форму, датчик 4 — в тупиковой зоне; t_1 — t_4 — значения времени достижения фронтом потока точек 1—4 полости формы.

во незастывшего расплава, находящегося в форме в этот момент. Это верно, поскольку масса подпитки определяется величиной объемного изменения расплава. Зная распределение температуры в изделии и зависимость объемной плотности расплава от давления и температуры, можно определить объем, занятый расплавом, по величине его температурной усадки.

Зависимость удельного объема полиамида П-68 от температуры при постоянном давлении была определена для ряда значений давления на расплав (рис. 5.57). Но помимо объема, занимаемого расплавом, необходимо знать распределение расплава по длине и высоте изделия. Анализ осциллограмм процесса формирования (рис. 5.58) дает возможность предположить, что разное время t начала падения давления в разных точках по длине формы свидетельствует о неодновременности застывания сечения изделия по его длине.

Падение давления совпадает с моментом полного застывания всего сечения изделия; этот процесс начинается с конца изделия и фронт застывания движется к впуску. Это подтверждается зависимостью, представленной на рис. 5.59. Так, масса образца, вырезанного из хвостовой части отливки, раньше прекращает свой рост (кривая 1), что свидетельствует о том, что этот участок уже застыл. Затем то же происходит последовательно с образцом, взятым из середины изделия (кривая 2) и с его начального участка (кривая 3).

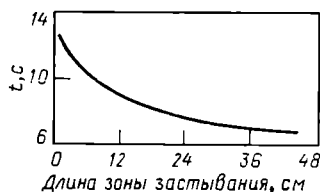
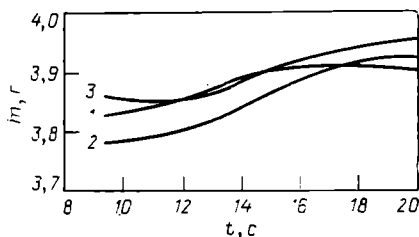


Рис. 5.59. Зависимость массы образцов, вырезанных из изделия, от времени выдержки под давлением:

1 — хвостовая часть изделия; 2 — средняя часть изделия; 3 — на входе в форму.

Рис. 5.60. Продвижение зоны полного застывания сечения изделия во времени.

Отсюда можно сделать вывод, что указанные точки на осциллограммах процесса формирования действительно характеризуют момент застывания данного сечения и можно построить картину продвижения фронта полного застывания сечения по длине во времени (рис. 5.60). Кроме того, можно заключить, что форма объема, занимаемого расплавом, с некоторого момента может считаться имеющей приближенно вид клина, острие которого постепенно подтягивается к основанию, входу в полость. В момент окончания заполнения форма этого слоя не клиновидная, а прямоугольная.

На основании полученных данных может быть выведена закономерность для расчета по массе дозы подпитки и положению фронта застывшего полимера в данный момент величины сечения этого слоя.

Из ранее упомянутых предпосылок следует равенство

$$V_1 - V_2 = \Delta V \quad (5.102)$$

где V_1 — объем незастывшего расплава в форме; V_2 — объем, занимаемый этим количеством расплава при температуре кристаллизации.

В этом равенстве

$$V_1 = S\bar{l}h; \quad V_2 = Gv; \quad \Delta V = \Delta mv \quad (5.103)$$

где l — длина незастывшей зоны; $\bar{h}$ — половина высоты этой зоны в точке $l/2$; S — ширина полости формы; G — масса расплава в форме; v — удельный объем материала при температуре и давлении отверждения; Δm — масса полной дозы подпитки с момента времени, соответствующего данным l и $\bar{h}$, до полного остывания изделия.

Отсюда

$$\bar{h} = \frac{\Delta mv + Gv}{Sl} \quad (5.104)$$

Принимаем, что температура в центре изделия постоянна вследствие непрерывного поступления свежего расплава и равна температуре расплава на входе в форму. Тогда при линейной зависимости профиля температур в незастывшем сечении величина G определяется как

$$G = \int_0^l 2 \left(\int_0^h \frac{Sdx}{v(T)} \right) dy \quad (5.105)$$

где $v(T)$ — зависимость удельного объема расплава от температуры, а

$$h = 2\bar{h}_y/l \quad (5.106)$$

функция $v(T)$, приведенная на рис. 5.57, имеет вид

$$v(T) = KT_{\pi} - K\Delta T \frac{x}{h} + b \quad (5.107)$$

где K и b — константы; $\Delta T = T_{\pi} - T_3$; T_{π} и T_3 — температуры поступления и застывания расплава соответственно.

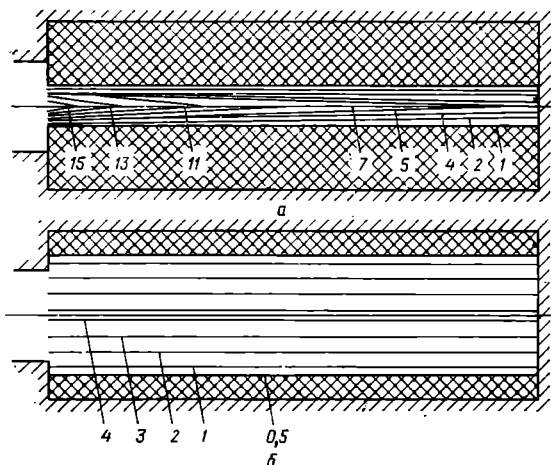


Рис. 5.61. Картина застывания изделия по экспериментальным (а) и расчетным (б) данным. Пояснения в тексте.

Интегрируя (5.105) и используя (5.106) и (5.104), получаем:

$$\bar{h} = \frac{\Delta m v(T)}{Sl \left(1 - \frac{2V_3}{K\Delta T} \ln \frac{b + KT_{\pi}}{l + KT_3} \right)} \quad (5.108)$$

С помощью уравнения (5.108) и графических зависимостей, приведенных на рис. (5.56) и (5.60) для технологического режима: температура литья 523 К, давление в полости формы 18,5 МПа, длина изделия 451 мм, толщина 3 мм была построена картина застывания сечения изделия во времени (рис. 5.61). На этом же рисунке дана кинетика застывания изделия, полученная при решении уравнения теплопроводности [см. уравнение (5.86)] при тех же технологических параметрах и значении коэффициента температуропроводности $a = 0,001 \text{ см}^2/\text{с}$ и значении $T_{\text{кр}} = 483 \text{ К}$. Цифры на рис. 5.61 обозначают время в секундах с момента окончания этапа заполнения, а сплошные линии являются границами зон застывания расплава. Таким образом, полученные количественные соотношения позволяют оптимизировать процесс формования изделий на стадии выдержки под давлением и на отверждение.

5.5.2. Выдержка под давлением и на отверждение при литье реактопластов

Формование изделий из термореактивных материалов на стадии выдержки под давлением и на отверждение имеет свои особенности, отличные от термопластов, заключающиеся в характере тепловых процессов, протекающих в форме, и процес-

сов отверждения. После окончания заполнения формы, во время которого происходит удаление из полости воздушных включений, начинают действовать законы сжатия монолитного расплава. В полость поступают дополнительные порции расплава, имеющего температуру T_0 ниже, чем температура стенки формы (T_c).

Одновременно протекает химическая реакция отверждения, скорость которой с прогревом материала в форме резко возрастает.

Процесс течения в значительной степени зависит от вязкости расплава, которая определяется температурой массы, деформационным воздействием и степенью протекания реакции. При этом вязкость расплава с ростом температуры уменьшается, а с увеличением степени протекания реакции возрастает.

Таким образом, при формовании реактопластов характер изменения давления расплава в оформляющей полости формы как функции времени и соответствующей пространственной координаты определяет совокупность тепловых, механических и химических процессов, протекающих в форме во время выдержки под давлением и на отверждение. В значительной степени протекание процессов на данной стадии зависит от геометрии изделия (максимальной длины отливки и толщины изделия).

В разд. 5.4.3 рассматривалась стадия заполнения формы. При этом выделялись две группы изделий: толстостенные и тонкостенные. К толстостенным изделиям относят такие, для которых время отверждения материала в литниковой системе вследствие быстрого прогрева расплава и, следовательно, более высокой скорости реакции отверждения много меньше времени отверждения в сравнительно толстом слое расплава в оформляющей полости. Поле давлений в толстостенных изделиях считается практически однородным. В таких изделиях отношение длины отливки к характерной толщине изделия не более 7—10 [146].

Анализ номенклатуры изделий, производимых из реактопластов литьем под давлением, показывает, что на долю толстостенных изделий приходится примерно 5—7%. Основную же часть составляют изделия коробчатого типа, для которых отношение L/d соответствует тонкостенным изделиям. Анализ процесса заполнения реактопластами оформляющих полостей при изготовлении толстостенных изделий показал, что точную границу между этапом заполнения и выдержкой под давлением установить трудно. При уменьшении пористости материала ниже $\beta=0,02$ давление в форме резко возрастает. Незначительный рост давления при дальнейшей подпитке полости, когда одновременно с уменьшением пористости расплава происходит сжатие самого полимера, существенного влияния на значение максимального давления в форме не оказывает (параметр $p_{\max}$ определяет усилие смыкания формы и влияет на механи-

ческие характеристики изделия). Аналитическое описание стадии заполнения при литье толстостенных изделий (см. разд. 5.4.3) достаточно полно описывает процесс формирования и позволяет решать технологические задачи, связанные с его оптимизацией. Иная физическая картина процессов, протекающих в форме на стадии выдержки под давлением и на отверждение, имеет место при литье тонкостенных изделий. Операция выдержки под давлением начинается с момента окончания уплотнения фронта потока расплава и установления в полости формы перепада давления.

Математическая модель процесса аналогична рассмотренной в разд. 5.5.1 для литья термопластов (см. рис. 5.54).

Ввиду того, что реакция отверждения реактопластов экзотермична и тепловой эффект реакции оказывает существенное влияние на распределение температуры в материале полимера, уравнение теплопроводности при тех же допущениях, что и в случае литья термопластов, имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{q_0}{\rho c} \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (5.109)$$

где q_0 — тепловой эффект реакции отверждения; ρ — плотность расплава; c — теплоемкость.

Уравнение кинетики химической реакции отверждения представлено в виде [146]

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = K_p(T) (1 - \xi)^{n_p}; \quad K_p(T) = K_{p0} e^{-\frac{U_p}{RT}} \quad (5.110)$$

Зависимостью ξ от продольной координаты пренебрегают. Это справедливо, поскольку при независимости температуры материала от x степень протекания реакции в слоях, достигших тупиковой стенки полости и прошедших наибольший путь, весьма мала (это объясняется малым временем заполнения формы и низкими скоростями протекания реакции при температурах впрыскиваемого расплава). В соответствии с [183] пренебрежимо мала также температурная зависимость теплофизических характеристик материала в реализуемом при переработке реактопластов диапазоне температур (393—473 К) [183].

Реологическое уравнение, определяющее вязкость композиции при любом температурно-временном и деформационном воздействии, имеет вид [116]

$$\eta = \eta_0(0) \varphi(\xi) e^{\frac{U_T}{RT}} \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^{\frac{1-k}{k}} \quad (5.111)$$

$$\varphi(\xi) = \begin{cases} 1; & \xi \leq \xi_* \\ 1 + \frac{(\xi - \xi_*)^{n_1}}{(1 - \xi)^{n_2}}; & \xi \geq \xi_* \end{cases}$$

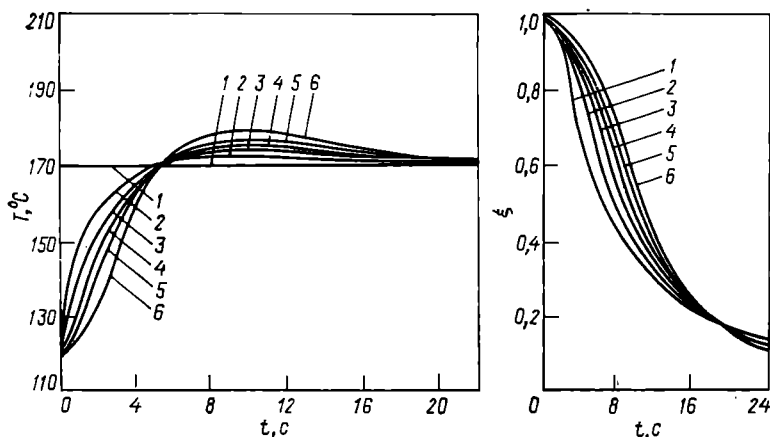


Рис. 5.62. Распределение температуры по толщине изделия во времени. Материал — фенольная композиция 03-010-2; $T_{\text{с.т.}}=170^\circ\text{C}$; $T_0=125^\circ\text{C}$; $d=2$ мм.

Значения y равны:

1 — $0,5d$; 2 — $0,4d$; 3 — $0,3d$; 4 — $0,2d$; 5 — $0,1d$; 6 — 0.

Рис. 5.63. Распределение степени отверждения ξ по толщине изделия во времени. Материал, параметры процесса и обозначения те же, что на рис. 5.62.

где ξ — степень протекания реакции отверждения в конце плато вязкости; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига; $\dot{\gamma}_0$, k , n_1 , n_2 , u_T , R , $\eta_0(0)$ — константы.

Уравнение состояния (сжимаемости) для реактопластов [146] представляется как

$$K_{\text{об}} = \frac{\bar{\rho} - \rho_0}{\rho_0} = p - p_0 \quad (5.112)$$

где $K_{\text{об}}$ — объемный модуль сжимаемости (считаем его независимым от температуры); ρ — плотность расплава реактопласта при избыточном давлении; ρ_0 — то же при атмосферном давлении.

Уравнение (5.112) справедливо для усредненной по сечению плотности. Оно было получено экспериментально без учета влияния усадки реактопласта в процессе отверждения. Как будет в дальнейшем показано, основная часть процесса выравнивания давления в полости происходит до момента окончания плато вязкости. В момент интенсивного роста вязкости (при достижении степени отверждения ξ_*), когда ожидается наибольшее влияние усадки при отверждении на значение плотности расплава, процесс выравнивания давления уже на 85—90% заканчивается. С учетом сказанного можно пренебречь влиянием степени отверждения на изменение плотности в интервале давлений, реализуемом при литье под давлением реактопластов. Вид уравнений движения и неразрывности при решении задачи об уплотнении расплава реактопласта на иссле-

дующим этапом остается таким же, как в разд. 5.5.1 [см. уравнения (5.89) — (5.91)].

Уравнения (5.109) и (5.110) автономны, от остальных не зависят и при граничном условии (5.87) и дополнительном условии $\xi|_{t=0} = \xi_0$ решаются численным методом. При этом получают поле распределений температуры материала и степени его отверждения по толщине изделия во времени. На рис. 5.62, 5.63 представлены примеры такого решения.

Анализ поля распределений температур показывает, что при протекании реакции отверждения вследствие ее экзотермичности расплав прогревается в середине толщины изделия до более высокой температуры, чем температура стенки формы. В дальнейшем с окончанием реакции отверждения температура материала выравнивается, приближаясь к значению T_c .

При известных функциях $T(t, y)$ и $\xi(t, y)$ система уравнений (5.110), (5.112), а также (5.89), (5.90) (см. разд. 5.5.1) при граничных условиях

$$p|_{x=0} = p_0; \quad \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=L} = 0; \quad p|_{t=0} = p_0(x)$$

позволяют выявить искомую функцию.

Совместное решение уравнения движения (5.89) и реологического уравнения (5.111) при допущении отсутствия скольжения расплава по стенкам формы и введении безразмерных переменных $y' = 2y/d$ и $t' = \frac{4a}{d^2} t$ позволяет определить среднерасходную скорость течения в виде

$$\bar{V} = \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^k \left(\frac{d}{2} \right)^{k+1} \frac{\gamma_0^{1-k}}{\eta_0 (0)^k} b(t') \quad (5.113)$$

где

$$b(t') = \int_0^1 \frac{(y')^{k+1}}{\varphi(\xi)^k} e^{-\frac{U_1^k}{KT}} dy'$$

В уравнении (5.113) $\partial p / \partial x$ не зависит от координаты y' . Выразив плотность через давление согласно уравнению (5.112) при условии $p \ll K_{06}$ и подставив значение среднерасходной скорости (5.113), получим из уравнения неразрывности (5.90):

$$\frac{\partial q}{\partial t'} = \frac{K_{06} \gamma_0^{1-k} p_0^{k-1} (d/2)^2 b(t')}{\eta_0 (0) a} \frac{\partial}{\partial x'} \left(\frac{\partial q}{\partial x'} \right) \quad (5.114)$$

где $q = p/p_0$; $x' = 2x/d$.

Введя вместо t' новую независимую переменную

$$L = \int_0^{t'} \frac{b(t') K_{06} \gamma_0^{1-k} p_0^{k-1} (d/2)^2}{\eta_0 (0) a} dt' \quad (5.115)$$

получим дифференциальное уравнение вида

$$\frac{\partial q}{\partial L} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial q}{\partial x'} \right)^k \quad (5.116)$$

Начальные и граничные условия его:

$$q \Big|_{L=0} = q_0(x'); \quad q \Big|_{x'=0} = 1; \quad \frac{\partial q}{\partial x'} \Big|_{x'=L'} = 0$$

где $L' = 2L/d$.

Равенство $\frac{\partial q}{\partial x'} \Big|_{x'=L'} = 0$ есть условие обращения в ноль расхода в сечении канала $x' = L'$. Поскольку в данной задаче $L' \gg 1$, то можно приближенно рассматривать ее решение в полограниченной области ($0 \leq x' \leq \infty$). При этом вместо указанного условия будет рассматриваться другое: $q \Big|_{x' \rightarrow \infty} = 0$.

Для уравнения (5.116) существует так называемое автомодельное решение, зависящее лишь от комплекса переменных, в частности L и x' [24]. Автомодельная переменная имеет вид:

$$\mu = \left(\frac{1}{k+1} \right)^{1/(k+1)} \frac{x'}{(L + L_0)^{1/(k+1)}} \quad (5.117)$$

где L_0 — постоянная, значение которой подбирается для удовлетворения начального распределения давления, от которого начинается процесс уплотнения реактопласта (при $L = 0$).

Решение уравнения (5.116) представляется в следующей форме:

$$q = \begin{cases} 1 - \left(\frac{k-1}{2k} \right)^{\frac{1}{k-1}} \int_0^\mu (\mu_0^2 - \mu^2)^{\frac{1}{k-1}} d\mu; & \mu < \mu_0 \\ 0; & \mu \geq \mu_0 \end{cases} \quad (5.118)$$

где

$$\mu_0 = \left(\frac{2k}{k-1} \right)^{\frac{1}{k+1}} \left[\int_0^1 (1 - v^2)^{\frac{1}{k-1}} dv \right]^{-\frac{k-1}{k+1}}$$

При известном параметре k для реактопласта μ_0 — константа.

Уравнение (5.118) является окончательным решением поставленной задачи. При известных параметрах процесса уплотнения, геометрии изделия и свойствах реактопласта оно позволяет рассчитать распределение давления в форме к концу этапа выдержки под давлением и при достижении такой степени отверждения, когда процесс течения расплава практически прекращается.

Рассмотрим порядок проведения расчета по определению конечного распределения давления.

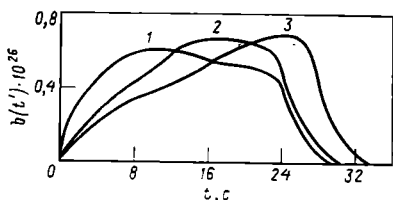


Рис. 5.64. Зависимость функции $b(t')$ от времени для различных толщин изделия. Материал — фенольная композиция 03-010-02; $T=170^\circ\text{C}$; $T_0=125^\circ\text{C}$; d равно:

1 — 2 мм; 2 — 3 мм; 3 — 4 мм.

1. Решается система уравнений (5.109), (5.110) и определяются зависимости $T(y, t)$ и $\xi(y, t)$.

2. При решении численным методом определяется зависимость функции $b(t')$ в уравнении (5.113) от времени и эта зависимость графически интегрируется.

На рис. 5.64 представлены примеры зависимости функции $b(t')$ от времени t . Ход зависимостей наглядно иллюстрирует процесс выравнивания давления в форме. В первый момент, когда с прогревом материала вязкость его резко падает (дей-

ствует член $e^{-\frac{U_r k}{KT}}$), функция $b(t')$ растет и происходит интенсивный процесс уменьшения перепада давления. После выравнивания температуры вязкость материала остается примерно постоянной (на кривой зависимости вязкости от степени протекания реакции этому соответствует область плато), чем объясняется почти горизонтальный ход зависимости $b(t')$ от t . Скорость выравнивания давления остается примерно постоянной. И, наконец, в момент резкого возрастания вязкости [действует член $\varphi(\xi)$] функция $b(t')$ резко идет вниз, стремясь к бесконечности. Процесс выравнивания давления резко притормаживается. Площадь под кривой характеризует замороженное состояние процесса, т. е. конечное распределение давления.

3. По уравнению (5.115) определяется параметр L , причем берется полное значение интеграла $\int_0^t b(t') dt'$

4. Рассчитывается значение автомодельной переменной по уравнению (5.117) для контролируемых точек полости. Следует отметить, что константа L_0 при расчете конечного распределения давления не оказывает практически никакого влияния на его значение и ею можно пренебречь.

5. По уравнению (5.118) определяется искомое значение относительного давления q в контролируемых точках, по которому при известном p_0 находится абсолютное давление.

Представленная методика расчета максимального давления в форме может быть упрощена введением некоторых допущений и использована для примерного оценочного расчета давления в форме в реальных условиях литья.

Для этого в уравнении теплопроводности (5.109) пренебрегают влиянием теплового эффекта реакции, и тогда оно принимает вид уравнения (5.86). Решение данного уравнения с

точностью до первого члена ряда хорошо известно. В данной задаче дополнительно пренебрегают зависимостью температуры от координаты y и считают, что температура в поперечном сечении постоянна и равна среднеинтегральной:

$$\bar{T}(t) = \frac{2}{d} \int_0^{d/2} T(y, t) dy$$

Второе допущение заключается в том, что вязкость композиции при достижении времени окончания плато вязкости, т. е. при $t = t_*$, мгновенно возрастает до бесконечности и процесс выравнивания давления также мгновенно прекращается. При данном допущении функция $\varphi(\xi)$ в уравнении (5.111) принимает вид

$$\varphi(\xi) = \begin{cases} 1; & \xi \leq \xi_* \\ \infty; & \xi > \xi_* \end{cases}$$

Введение данного допущения диктуется тем, что время от момента начала роста вязкости композиции (при $\xi = \xi_*$) до момента, в который вязкость композиции принимает такое значение, когда процесс выравнивания давления практически прекращается, сравнительно мало и составляет не более 10—15% от общего времени процесса уплотнения. Значение полного интеграла $\int_0^{t'} b(t') dt'$ (а именно оно определяет конечное распределение давления) уменьшится при этом также незначительно — практически на площадь под ниспадающей ветвью кривой (см. рис. 5.64). Отсюда и оправданность допущения о независимости плотности расплава на этапе выдержки под давлением от степени протекания реакции.

При таком допущении функция $b(t')$ [см. уравнение (5.113)] после интегрирования принимает следующее значение:

$$b(t') = \exp \left[-\frac{U_T k}{R \bar{T}(t')} \frac{1}{k+2} \right] \quad (5.119)$$

Вид уравнений (5.115), (5.117) и (5.118) не изменяется. Последовательность расчета конечного распределения давления аналогична последовательности уточненного расчета.

Аналитическое решение задачи о выравнивании давления в форме было проверено экспериментально. Исследования проводились на промышленной композиции реактопласта на основе фенолоформальдегидной смолы с древесным наполнителем (марка 03-010-02) в опытной литьевой машине. В качестве изделия была принята пластина длиной 200 мм и шириной 50 мм, а толщина варьировалась — 2, 3, 4 и 6 мм. Давление составляло 40, 60 и 80 МПа, температура формы T_c — 443 и 463 К. По всей длине входа в формующую полость контролировалось давление расплава.

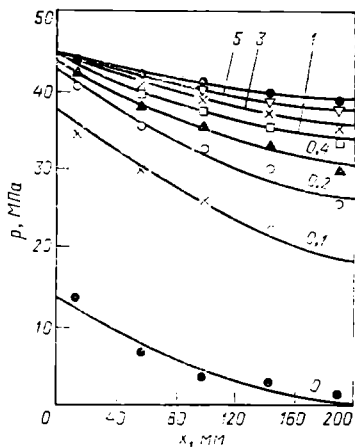


Рис. 5.65. Распределение абсолютного давления по длине формы; $T=190^\circ\text{C}$; $d=4$ мм; $P_d=80$ МПа. Числа у кривых — время в секундах.

На рис. 5.65 и 5.66 представлено распределение абсолютного и относительного давления по длине формы во времени. Штриховые линии на рис. 5.66 — расчетные зависимости, сплошные — экспериментальные. Анализ результатов показывает, что наблюдается вполне удовлетворительное соответствие расчетных данных с экспериментальными. Максимальное расхождение со-

ставляет не более 10—12%. Из рис. 5.67, на котором представлены конечные распределения относительного давления для ряда исследованных режимов, следует, что процесс выравнивания давления в форме зависит от температуры формы, давления дожатия и толщины изделия. При этом с ростом каждой из указанных величин (при постоянных значениях остальных) движение в форме усиливается.

Таким образом, получаемое аналитическое решение процесса выравнивания давления в форме позволяет решать ряд технологических задач при формовании изделий из реактопластов на стадии выдержки под давлением и на отверждении.

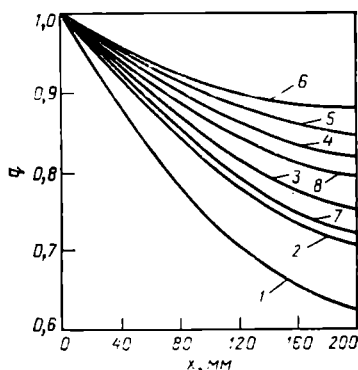
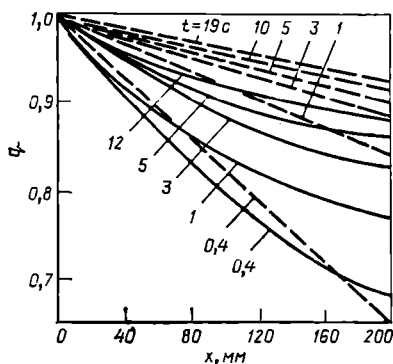


Рис. 5.66. Распределение относительного давления по длине формы (штриховые линии — расчетные); $T=190^\circ\text{C}$; $d=4$ мм; $P_d=80$ МПа. Числа у кривых — время в секундах.

Рис. 5.67. Конечное распределение относительного давления по длине формы. Соответствующие значения $T_{ст}$, d , p_d и t :

1 — 170°C ; 2 мм; 40 МПа; 19 с; 2 — 190°C ; 2 мм; 40 МПа; 13 с; 3 — 170°C ; 2 мм; 60 МПа; 15 с; 4 — 190°C ; 3 мм; 60 МПа; 9 с; 5 — 170°C ; 4 мм; 80 МПа; 10 с; 6 — 190°C ; 3 мм; 60 МПа; 11 с; 7 — 190°C ; 4 мм; 60 МПа; 10 с; 8 — 190°C ; 4 мм; 80 МПа; 12 с.

1. По конечному распределению давления можно определить необходимое максимальное усилие запираания формы по уравнению (5.101). Проведенные исследования процесса уплотнения расплава показали, что расчетные значения распределения давления выше экспериментальных (см. рис. 5.66). Таким образом, усилие смыкания формы, рассчитанное по (5.101), будет также завышенным, гарантируя некоторый запас.

2. При известном давлении в точке полости, наиболее удаленной от входа в форму, необходимым для литья качественного изделия, можно определить оптимально устанавливаемое давление дожатия. Расчет проводится следующим образом. При известном значении q в заданной точке по уравнению (5.118) определяют μ , затем по уравнению (5.117) при известном x' — переменную L . Подставляя в уравнение (5.115) значение полного интеграла $\int_0^{t'} b(t') dt$, рассчитывают давление p_0 (соответственно давление дожатия).

3. Полученное совместное решение системы уравнений (5.109) и (5.110), описывая распределение степени протекания реакции в массе литьевого изделия, позволяет однозначно установить время достижения оптимальной степени отверждения, т. е. оптимальное время выдержки на отверждение.

С целью использования представленного аналитического решения в реальных процессах формования изделий необходимо знание двух технологических параметров — температуры расплава T_0 и давления p_0 на входе в оформляющую полость. Поскольку в промышленных формах контроль данных параметров затруднен, их определяют расчетным путем.

Расчет температуры на входе в оформляющую полость сводится к определению прироста температуры расплава за счет диссипации тепла при прохождении его через каналы литниковой системы (увеличением температуры расплава вследствие прогрева от стенок формы пренебрегают) и прибавлению получаемой величины ΔT к температуре расплава, выходящего из пластикационного цилиндра (контроль этой температуры легко осуществить).

Соответственно p_0 (давление на входе в оформляющую полость) определяется посредством расчета перепада давления, теряющегося в каналах литниковой системы, и исключения его из значения установленного давления дожатия, контролируемого приборами машины. Порядок расчета следующий: 1) определяют расход материала (по скорости перемещения червяка; 2) рассчитывают скорость движения расплава в каналах литниковой системы; 3) по закону скольжения [см. уравнение (5.73)] определяют напряжение сдвига и соответственно силу трения на стенках каналов; 4) определяют перепад давления (соответственно p_0) и далее при известном расходе — работу сил давления; 5) по затраченной работе определяется прирост температуры T и соответственно значение T_0 .

5.6. РЕЖИМЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС ЛИТЬЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Надежное управление процессами литья под давлением и их регулирование с целью обеспечения высокой производительности и качества изделий требует знания закономерностей протекания отдельных стадий процесса, а также поведения термопластов и реактопластов при их переработке. Перерабатываемые материалы должны быть по возможности сухими и свободными от низкомолекулярных фракций, для чего подвергаются предварительной сушке при определенных режимах, приведенных ниже:

Перерабатываемый материал	Температура сушки, К	Время сушки*, мин
Поливинилхлорид	330—360	60**
Полистирол	340—350	60***
Полиэтилен	360—370	60
Полипропилен	360—380	60
Полиметилметакрилат	340—370	До 300
Полиоксиметилен	370—380	360
Поликарбонат	380—395	360
Полиамид	350—360	До 480
Полиуретан	350—370	До 480

* Приведены значения времени сушки при нормальном давлении. Время сушки жет меняться в зависимости от типа наполнителя и его содержания.

** Время сушки пластифицированного ПВХ может меняться при изменении рецептуры.

*** Для АБС-сополимеров — до 180 мин.

Сушку поликарбоната, полиамида и полиуретана рекомендуется производить под вакуумом.

Способность перерабатываемых материалов заполнять материальный цилиндр зависит как от гранулометрического состава, так и от содержания смазывающих веществ, красителя, пигментов.

Уже подвод дозы материала в зону загрузки материального цилиндра и оттуда в полость подпора должен быть проведен с большой точностью, так как передозировка может привести к поломке машины, а недостаточная дозировка — к браку изделий.

При переработке литьевых композиций с волокнистыми наполнителями с увеличением длины волокон возрастают трудности загрузки. Так как, с другой стороны, длинноволокнистые наполнители обеспечивают хорошие механические свойства, то такие материалы перерабатываются литьем под давлением с применением дополнительных дозирующих устройств (мешалок, уплотнительных червяков).

При изготовлении мелких изделий литьевым методом из материалов с сильной анизотропией свойств или изделий, в процессе литья которых происходит значительное разрушение волокон в относительно узких литниковых каналах, рекомендуется применение литьевых композиций с коротковолокнистыми наполнителями.

Таблица 5.2. Параметры переработки различных типов пластических масс методом литья под давлением

Тип пластмасс	Давление литья*, МПа	Температура литья (в зоне сопла), К	Температура формы, К	Усадка.
Поливинилхлорид непластифицированный	100—200	450—460	330	0,5—1,0
пластифицированный	80—100	440—455	320	0,5—2**
Полистирол	50—200	430—450	300—320	0,5—0,6
Ударопрочный полистирол	100	420—440	320—340	0,7—1,0
Сополимер стирола с акрилонитрилом	50—180	510—520	320—350	0,15—0,2
АБС-пластик	80—180	490—510	330—360	0,4—0,7
Полиэтилен низкой плотности	60—120	420—510	320—360	1,5—5,5
Полипропилен	180—200	470—520	320—350	1,2—1,5***
Полиметилметакрилат	80—200	450—520	320—370	0,2—0,6
Полиоксиметилен	80—150	440—500	330—360	1,5—3,5
Поликарбонат	80—120	570—580	360—390	0,7—0,8
Полиамид	70—120	490—530	320—350	0,2—2,0
Полуретан	70—100	450—470	300—360	1,0—1,5
Ацетат целлюлозы	80—120	440—480	310—340	0,4—0,7***
Фенопласты	90—100	370—390	430—460	0,5—0,9
Аминопласты	70—160	365—390	430—450	0,3—1,0
Полиэфиры	90—120	335—350	410—460	0,1—0,2

* Зависит от молекулярной массы.

** При содержании 40% диоктилфталата.

*** Сильно зависит от направления ориентации образца.

Температурно-временное поведение перерабатываемого материала имеет большое значение как в процессах пластикации, так и заполнения формы и выдержки под давлением, особенно с точки зрения подбора и поддержания температурного режима в пластикационном цилиндре литьевой машины и в литьевой форме. При выборе перерабатываемого материала важнейшим критерием для термопластов является текучесть как функция температуры массы (характеризуемая, например, показателем текучести расплава), а для реактопластов — время жизнеспособности (время до начала реакции отверждения), определяемое по кривой отверждения, получаемой на пластографе Канавца.

С учетом указанных факторов производится выбор температур материального цилиндра и формы (табл. 5.2), от которых зависят процессы охлаждения (для термопластов) и отверждения (для реактопластов). Так, технологически обусловленная усадка изделий в значительной степени зависит от этих стадий процесса. Общая усадка, однако, зависит для конкретного полимера от геометрии изделия и результирующего действия параметров переработки.

При переработке методом литья под давлением термореактивных пластмасс необходимо учитывать следующие особенности. При переработке фенопластов минимальная влажность должна быть около 3%, так как в сухом состоянии перерабатываемость этих материалов ухудшается. Если к изделиям предъявляются высокие требования по прочности (например, к сложным техническим изделиям), то необходимо применять специальные типы фенопластов, которые даже при очень малом содержании влаги имеют хорошую текучесть. Для удаления летучих компонентов смеси в процессе пластикации вблизи загрузочной воронки необходимо предусмотреть устройство для дегазации. Водяные пары, образующиеся в полости литевой формы в результате реакции поликонденсации, следует удалять через вентиляционные каналы.

Модифицированные каучуком литевые марки фенопластов сохраняют текучесть в относительно широком температурно-временном диапазоне. Однако из-за невысокой текучести эти материалы требуют повышенных давлений литья, вследствие чего рекомендуется применять более высокую температуру литевого сопла.

Литевые аминопласты обладают довольно значительной гигроскопичностью, вследствие чего их транспортирование и хранение сложнее, чем фенопластов. Аминопласты проявляют склонность к переотверждению, что проявляется в хрупкости изделий, образовании трещин на их поверхности.

В отличие от прессования, при литье под давлением опасность неравномерности степени отверждения как следствия разнотолщинности изделия значительно меньше, так как литевая масса впрыскивается в полость литевой формы с температурой, равномерно распределенной и близкой к температуре отверждения, так как при прохождении через сопло и литниковые каналы масса интенсивно разогревается. Отсюда следует, что методом литья под давлением можно получать изделия такой геометрической формы, изготовление которых невозможно методом прессования. При переработке светлых марок аминопластов температурному режиму следует уделять особое внимание, так как даже незначительный перегрев может привести к появлению следов побежалости на изделии.

Полиэфирные литевые массы, благодаря возможности выбора множества вариантов рецептуры и типов связующего, удовлетворяют многообразию требований переработки. В последнее время применяются новые полиэфирные литевые массы, свободные от стирола, прочные гранулы которых обладают хорошей сыпучестью; из них получают изделия с высокой точностью размеров.

При применении волокнистых композиций следует ориентироваться на литевые массы с коротковолокнистыми наполнителями, так как в этом случае можно избежать изменения свойств из-за разрушения волокон в литниковой области. Сле-

дует при этом ожидать незначительной анизотропии механических свойств изделий.

Технологические свойства литьевых масс на основе диаллилфталата аналогичны свойствам полиэфирных масс.

Процесс отверждения эпоксидных литьевых масс протекает по аддитивному принципу (ступенчато), вследствие чего в полости литьевой формы нет свободных промежуточных продуктов отверждения. Недостатком этих материалов является то, что отверждение начинается уже при относительно низких температурах. Благодаря успехам в развитии технологии полимеров в последние годы удалось значительно увеличить жизнеспособность эпоксидных смол при комнатной температуре. Достижением в этой области следует считать создание формовочных масс, переработка которых в изделия возможна при низких давлениях (так называемых литьевых формовочных масс низкого давления). Для эпоксидных смол характерна весьма незначительная усадка и, следовательно, невысокие внутренние напряжения в готовых изделиях, а также сравнительно небольшая тенденция растрескивания их поверхности.

При переработке литьевых эпоксидных масс следует учитывать их адгезивные свойства (так, они используются как клей для металлов). В связи с этим внутренние поверхности литьевых форм должны быть хромированы. Вследствие незначительной вязкости расплава процесс заполнения оформляющей полости литьевой формы при переработке эпоксидных смол осуществляется в струйном режиме, в связи с чем обеспечиваются хорошие условия вентиляции литьевой формы.

При переработке эпоксидных смол, в отличие от полиэфирных масс, повышение температуры в значительной степени является следствием диссипативных тепловыделений. При этом возможно повышение температуры формы до 510 К, так как температура разложения эпоксидных формовочных масс лежит значительно выше, и при выдержке материала в литьевой форме, необходимой для завершения реакции отверждения, не происходит его термического разрушения. В связи с этим литьевые эпоксидные композиции можно перерабатывать с применением литьевых форм с точечными литниками, что позволяет значительно снизить время их отверждения.

5.7. ЛИТЬЕВЫЕ МАШИНЫ

5.7.1. Общая характеристика современных литьевых машин

Число литьевых машин составляет приблизительно 35% от общего количества машин для переработки пластмасс. Начиная с 1965 г. наблюдается скачкообразный рост производства новых литьевых машин [227].

На рис. 5.68 и 5.69 представлены закономерности изменения основных параметров литьевых машин с течением времени. На-

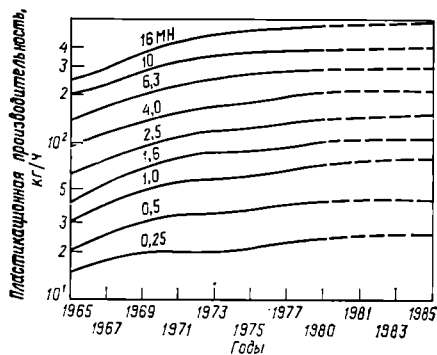


Рис. 5.68. Диаграмма изменения мощности литейных машин за период с 1965 г. по 1985 г. Цифры у кривых — усилие смыкания литейных форм.

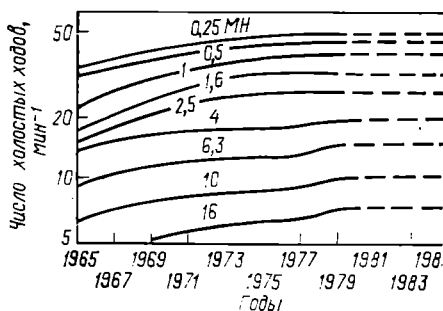


Рис. 5.69. Диаграмма изменения быстроходности литейных машин за период с 1965 г. по 1985 г. Цифры у кривых — усилие смыкания литейных форм.

ряду с увеличением производительности и установленной мощности привода при выборе конструкций литейных машин необходимо учитывать следующие обстоятельства: а) чрезвычайно различные задачи переработки, обусловленные многообразием ассортимента перерабатываемых литьем под давлением пластмасс; б) многообразие конструкций изделий, получаемых методом литья под давлением; в) высокую степень механизации и автоматизации процессов производства изделий методом литья под давлением; г) экономическую эффективность переработки полимеров методом литья под давлением на машине данной конструкции.

От литейных машин требуется высокая экономичность в сочетании с минимальными энергозатратами при получении изделий высокого качества.

5.7.2. Механизмы смыкания литейных форм

Для смыкания форм литейных машин применяются электро-механические, гидравлические и комбинированные механизмы.

На рис. 5.70 показана принципиальная конструкция механизма смыкания с симметричным или сдвоенным коленчато-рычажным узлом. Существуют и другие конструкции гидромеханического узла смыкания: с коленчато-рычажным механизмом и неподвижным гидроцилиндром смыкания и с коленчато-рычажным механизмом и подвижным гидроцилиндром смыкания.

В работе [222] исследовалась кинематика различных коленчато-рычажных механизмов запирающих литейных форм.

Для коленчато-рычажных механизмов с неподвижным гидроцилиндром смыкания характерна возможность реализации минимального хода раскрытия литейных форм. Важными показателями для них являются: отношение максимальной скорости

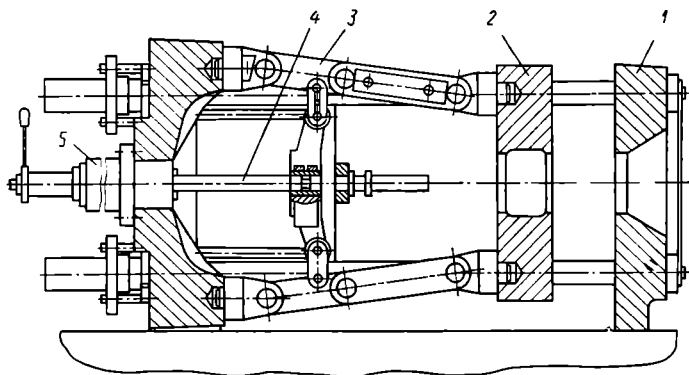


Рис. 5.70. Конструкция сдвоенного коленчато-рычажного механизма смыкания литевых форм:

1 — неподвижная плита; 2 — подвижная плита; 3 — рычажная система; 4 — шток; 5 — гидроцилиндр.

размыкания v_p к максимальной скорости смыкания v_c ($v_p/v_c \approx 2$) и отношение минимального усилия размыкания F_p к минимальному усилию смыкания F_c ($F_p/F_c \approx 0,5$).

Механизмы смыкания с коленчато-рычажным узлом и подвижным гидроцилиндром смыкания обладают тем преимуществом, что для реализации того же пути запирания может быть использован меньший гидравлический цилиндр, чем в механизмах с неподвижным гидроцилиндром.

Согласно [223], для параллельной рычажной системы запирания необходимо гидравлический цилиндр запирания располагать в направлении оси машины. Путь смыкания в этом слу-

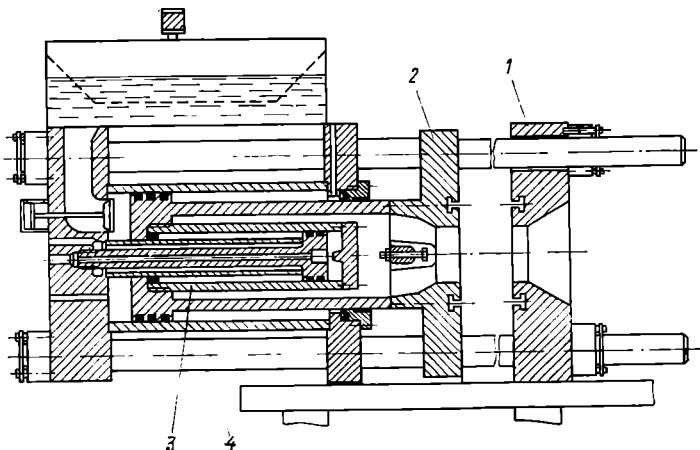


Рис. 5.71. Конструкция гидравлического механизма смыкания литевых форм:

1 — неподвижная плита; 2 — подвижная плита; 3 — гидроцилиндр ускоренного смыкания; 4 — гидроцилиндр запирания.

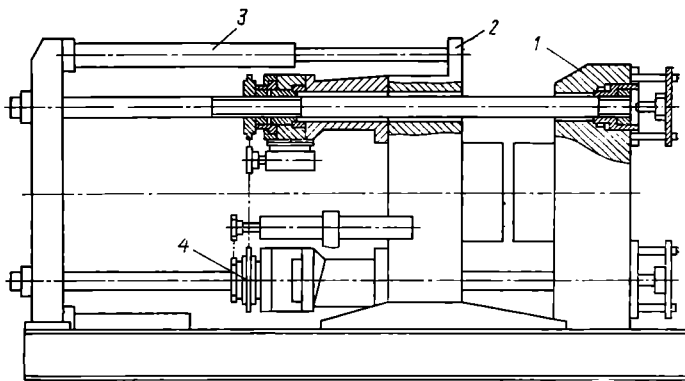


Рис. 5.72. Комбинированный механизм смыкания литейных машин с кратковременным воздействием усилия смыкания:

1 — неподвижная плита; 2 — подвижная плита; 3 — гидроцилиндр; 4 — винтовой механизм смыкания.

чае не ограничивается высотой машины. Отсюда следует, что такие системы необходимо применять в больших литейных машинах. Однако, как и в гидравлических механизмах запираания, максимальный ход литейной формы должен быть в 1,5—2 раза больше, чем ход поршня и подвижной плиты.

Названные механизмы позволяют реализовать большой путь раскрытия формы, который, однако, зависит от размеров механизма привода. Определяющим является приводной кривошип, длина которого зависит от ширины плиты крепления литейной формы.

Отношение скоростей смыкания и размыкания при использовании параллельной рычажной системы по сравнению с применением простого коленчато-рычажного механизма в направлении раскрытия формы является величиной переменной. Оно проходит через максимум и в конце раскрытия формы достигает минимума. Так как изменение отношения усилий размыкания и смыкания носит обратный характер, то к началу процесса смыкания наблюдаются большие ускорения.

Коленчато-рычажные механизмы смыкания потребляют на 15—20% меньше энергии и рабочей жидкости по сравнению с гидравлическими механизмами. Их недостатком является интенсивная изнашиваемость шарнирных соединений и плохая воспроизводимость усилий смыкания. Первый из указанных недостатков может быть частично устранен за счет применения централизованной смазки; для улучшения же воспроизводимости установленных усилий смыкания используют регулирование давления жидкости в гидроцилиндре механизма смыкания.

В работе [224] показано, что гидравлический механизм смыкания создает наиболее благоприятные предпосылки для регулирования усилий смыкания. В этих механизмах обеспечива-

ется исключение перегрузки или деформации колонн в процессе впрыска. Недостатком гидравлических механизмов запира- ния является большой расход рабочей жидкости при смыкании и размыкании форм. На рис. 5.71 представлена конструкция полностью гидравлического механизма смыкания с конструк- тивными особенностями, обеспечивающими большую жесткость, короткое время холостого хода и плотность смыкания литьевых полуформ.

В отличие от гидромеханических механизмов смыкания гид- равлические механизмы требуют более высоких затрат на си- стемы гидравлического и электрического управления.

На рис. 5.72 представлена конструкция комбинированной системы смыкания. В комбинированной системе предусмотрено гидромеханическое смыкание формы и гидравлический метод создания усилия запира- ния.

5.7.3. Механизмы пластикации и впрыска

Механизм пластикации и впрыска литьевой машины дол- жен выполнять три основные задачи: перевод перерабатывае- мого материала из твердого состояния в вязкопластическое — пластикацию; заполнение замкнутой литьевой формы распла- вом — впрыск и выдержку под давлением; относительное дви- жение (перемещение) к механизму смыкания форм.

В современных литьевых машинах, как отмечалось, преиму- щественно применяется принцип червячно-поршневой пластика- ции и этим определяется конструкция механизма впрыска. В настоящее время, независимо от типов перерабатываемых полимеров, разработана методика расчета мощности привода червяка. Мощность привода $P_{пр}$ равна

$$P_{пр} = M_{ч} \frac{\pi N}{30} \quad (5.120)$$

или

$$P_{пр} = M_{ч} \frac{2v_{окр}}{D} \quad (5.121)$$

где $M_{ч}$ — крутящий момент на валу червяка; N — частота вращения червяка; $v_{окр}$ — окружная скорость червяка.

Крутящий момент на валу червяка зависит от типа перера- батываемого материала (его реологических свойств), геомет- рии червяка, температуры пластикации, частоты вращения червяка и давления подпора (пластикации). Влияние частоты вращения (в рабочем интервале частот вращения) в общем случае незначительно. При переработке высоковязких материа- лов повышение частоты вращения червяка влечет за собой не- которое увеличение крутящего момента.

По кривым течения, исходя из скорости и напряжения сдви- га, можно найти значение кажущейся вязкости и судить, умень-

шается ли вязкость с изменением скорости сдвига (или частоты вращения) или остается постоянной. В последнем случае крутящий момент с увеличением частоты вращения червяка увеличивается.

При выборе червяков наблюдается тенденция применения универсальных, так называемых трехзонных червяков. Стандартные червяки в настоящее время выполняются таким образом, что, кроме непластифицированных ПВХ, полиметилметакрилата и реактопластов, ими можно переработать все типы полимеров. Специальные червяки применяются для переработки одного материала, обладающего специфическими особенностями.

Необходимость увеличивать производительность машин, перерабатывать наполненные и вторичные материалы, а также добиваться экономии на операциях переработки (при помощи предварительной сушки, окраски) предъявляет к пластикаторам в настоящее время повышенные требования.

Улучшение качества расплава главным образом достигается оптимизацией геометрии червяка при соответствующей его длине. Для стандартных червяков в настоящее время длина составляет $L = (17 \div 22) D$.

Все чаще применяются в перерабатывающей промышленности механизмы пластикации с дегазацией. При этом необходимо без увеличения длины червяка (по сравнению со стандартными червяками) создавать условия непосредственного массообмена с окружающей средой.

Привод червяка является важнейшим потребителем энергии в литьевых машинах. При конструировании привода необходимо учитывать крутящий момент, его изменение в процессе работы (в момент пуска, при стационарном режиме), способность выдерживать перегрузки, возможности изменения частоты вращения и крутящего момента различных приводных систем.

Решающим критерием оценки привода является коэффициент полезного действия. В основном различают гидравлические и электромеханические системы привода.

Гидравлические приводные системы выполняются быстроходными, тихоходными и со средней скоростью вращения. Тихоходными являются гидравлические системы привода с высоким крутящим моментом в области частот вращения от 0 до 500 об/мин. В отличие от быстроходных приводов тихоходные способны передавать крутящие моменты на червяк без промежуточных редукторов. В маленьких литьевых машинах приводы со средним значением скоростей обеспечивают прямую передачу крутящего момента на червяк.

Электромеханические приводные системы состоят из электродвигателя и редуктора.

Ниже перечислены преимущества гидромоторов и электродвигателей.

Гидромоторы: прямой (без редуктора) привод; бесступенчатое регулирование частоты вращения червяка; мягкий бесступенчатый пуск; безопасность при перегрузке.

Электродвигатели: высокий коэффициент полезного действия; постоянство частоты вращения при эксплуатации за пределом установленной мощности; высокий пусковой момент; способность воспринимать перегрузку.

При выборе литьевых машин важнейшим параметром является пластикационная производительность. Под пластикационной производительностью понимают отношение объема набранной дозы расплава к времени пластикации. Пластикационная производительность универсальных, или трехзонных, червяков линейно зависит от частоты их вращения и обратно пропорциональна давлению подпора; при этом она определяется характеристикой перерабатываемого материала и ходом (величиной смещения) червяка.

При заполнении оформляющей полости литьевой формы с выдержкой под давлением идеальная мощность впрыска или идеальная работа впрыска являются характерными параметрами производительности механизма.

Под идеальной мощностью впрыска $N_{ид}$ понимают произведение объема набранной дозы расплава V_p и давления впрыска p_v , деленное на минимальное время впрыска t_v :

$$N_{ид} = p_v \frac{V_p}{t_v} \quad (5.122)$$

Идеальная работа впрыска равна произведению объема впрыскиваемого расплава полимера на давление впрыска.

Для решения конкретных задач переработки, как уже указывалось выше, необходимый объем расплава полимера приближенно рассчитывается из массы изделия m с литником и удельного объема расплава $v_{уд}$:

$$V_p = mv_{уд} \quad (5.123)$$

Значения $v_{уд}$ можно получить из диаграммы или паспорта на перерабатываемый материал, где заводом-поставщиком сырья для заданной температуры переработки и давления подпора приводятся данные по удельному объему. Обычно точность таких расчетов составляет порядка 20% [223].

Давление, возникающее при впрыске на входе в сопло, зависит от сопротивления течения расплава в литниковых каналах и оформляющей полости. В табл. 5.3 приведены ориентировочные значения ожидаемых максимальных давлений впрыска для различных групп литьевых форм. Из таблицы следует, что в нормальной области литья реализуется максимальная скорость впрыска, равная 150—180 мм/с.

При впрыске вспененных термопластов максимальная скорость впрыска обычно составляет 600—700 мм/с. При этом требуется мощность впрыска $N_{ид} \approx 150$ кВт.

Таблица 5.3. Рекомендуемые давления впрыска для различных материалов

Тип полимера	Давление, МПа		
	толстостенные изделия	нормальные изделия	тонкостенные изделия и точечные литники
Непластифицированный ПВХ	100—120	120—150	150
Поликарбонат	100—120	120—150	150
Полиакрилаты	100—120	120—150	150
Полиметилметакрилаты	100—120	120—150	150
Полиформальдегиды	85—100	100—120	120—150
Полиэтилен	70—100	100—120	120—150
Полистирол	80—100	100—120	120—150
Реактопласты	100—140	140—175	175—230
Эластомеры	80—100	100—120	120—150

5.7.4. Привод рабочих органов

Для основного гидравлического привода литьевых машин в настоящее время в качестве рабочих жидкостей в основном применяются различные масла.

Независимо от разнообразия исполнения все гидравлические системы объединяются общей основной схемой, в которой выделяются основные функции — включение, регулирование и выключение.

Генераторы давления (насосы) всасывают жидкость, сообщают ей скорость v и под давлением p через трубопроводы подают потребителю (гидромоторам, рабочим цилиндрам). При выборе насоса для главного привода литьевых машин учитывают: общий энергетический коэффициент полезного действия; возможность управления и регулирования; срок службы и чувствительность к неполадкам; бесшумность работы.

В настоящее время существует три системы приводов: стационарные насосные приводы; сложные насосные приводы; комбинированные насосно-аккумуляторные приводы. С точки зрения энергоемкости и стоимости наиболее предпочтительно применение стационарных (регулируемых) насосных приводов.

Давление и объемный поток могут постоянно удовлетворять потребности отдельных потребителей во время цикла литья под давлением, если переходный период система проходит с небольшим временем простоя. Только при производительности от 100 до 120 л/мин выполняется это условие. Однако при высоком энергетическом коэффициенте полезного действия создается относительно высокий уровень шума.

При применении сложных насосных приводов с помощью соответствующей схемы управления удастся также создать энергетически благоприятный вариант привода. Включением или отключением отдельных насосов, например, во время заpira-

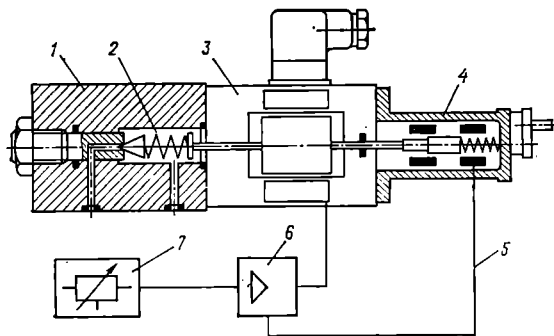


Рис. 5.75. Гидравлический распределитель с постоянным магнитом с обратной связью:

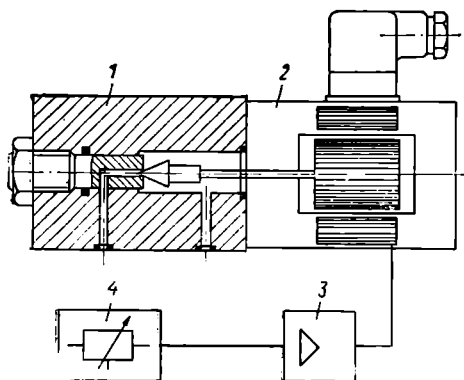
1 — распределитель; 2 — обратный клапан; 3 — магнит; 4 — датчик регистрации пути штока; 5 — обратная связь; 6 — усилитель; 7 — потенциометр.

лем, электрически управляемым механизмом, клапаном пропорционального давления.

На рис. 5.73 схематично представлено распределительное устройство с цифровым управлением, с пятью элементами и числом ступеней z , равным $z=2^n-1=31$ (где n — число элементов).

Пропорциональные распределители показаны на рис. 5.74—5.77. Электрически управляемые распределители (клапаны) требуют тщательной фильтрации масла. Изменение потока жидкости (количество потребляемого масла) можно регулировать дроссельными и золотниковыми распределителями, соленоидными клапанами.

Расход жидкости через дроссельный клапан определяется степенью дросселирования и перепадом давления. Чтобы уменьшить влияние вязкости масла, дроссельные распределители выполняются, как правило, с небольшим ходом.



В отличие от пропорциональных распределителей серво-распределители требуют высокой степени очистки масла. Серво-распределители выбраны правильно, если достигается максимальный поток, обеспечивающий требуемую скорость. Они устанавливаются

Рис. 5.76. Гидравлический распределитель с магнитом, регулирующим усилием смыкания:

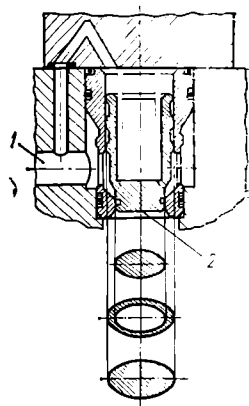
1 — распределитель; 2 — магнит; 3 — усилитель; 4 — потенциометр.

как можно ближе к потребителю. Ячейки фильтра должны иметь размеры 10—25 мкм.

Регулирование направления потока масла осуществляют при помощи обычных путевых (магистральных) вентилей. Для технически грамотного и экономически целесообразного регулирования необходимо свести к минимуму сопротивление вентилей. Поэтому зависимость потока от перепада давления является показателем совершенства конструкции приборов. Границы применения шпиндельных путевых вентилей определяются силами трения о направляющие стенки и величиной напора.

Время отключения (скорость включения) непосредственно регулируемых путевых вентилей определяется величиной усилия, создаваемого магнитом. При применении постоянных магнитов индуктивность магнитной катушки вызывает замедленное включение. Достоинства золотниковых распределителей с постоянными магнитами является бесшумная работа, большая сила включения и независимость работы от положения сердечника катушки. Повышение скорости работы литьевых машин требует от гидравлических распределительных механизмов обеспечения передачи больших мощностей за короткое время. Для выполнения этих требований необходимо применять специальные исполнительные элементы.

Гидравлические логические распределительные механизмы. В логических распределительных механизмах управление функциями «открыто» и «закрыто» осуществляется по изменению давления на поверхностях конуса распределителя. На рис. 5.77 показано сечение логического элемента, которое иллюстрирует возможность действия давления среды на три различные поверхности. Гидравлические логические распределители имеют следующие преимущества [227]: большая герметичность; высокая и надежная пропускная способность вследствие низких сопротивлений; достаточно высокий гидравлический коэффициент полезного действия из-за небольших потерь жидкости; благоприятные условия включения, регулируемое перекрытие при включении, отсутствие гидравлических ударов при включении; высокая надежность включения благодаря нечувствительности к засорению; низкий уровень шума; гибкость встроенных блоков системы благодаря применению различных управляющих плат; легкость отыскания помех (поломок) и быстрый ремонт; небольшое время простоя; длительный срок



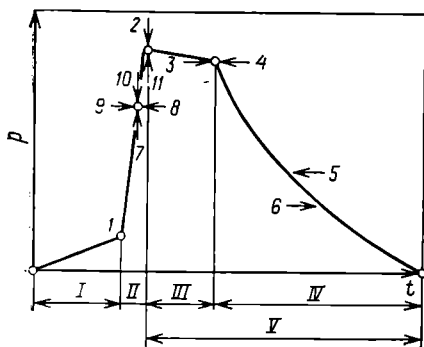


Рис. 5.78. Зависимость давления в форме от времени:

I — заполнение формы; II — сжатие; III — выдержка под давлением; IV — выдержка без давления; V — формование изделия; 1 — окончание процесса заполнения оформляющей полости формы; 2 — снижение давления в форме; 3 — переключение на выдержку под давлением с запаздыванием; 4 — то же с опережением; 5 — снижение подпитки; 6 — увеличение подпитки; 7 — снижение температуры расплава; 8 — повышение скорости впрыска; 9 — снижение скорости впрыска; 10 — повышение температуры расплава; 11 — увеличение давления в форме.

службы благодаря снижению износа; небольшая потребность в монтажной площади, следовательно, незначительная стоимость. Логические элементы просты по конструкции, они легко перестраиваются по функциональному назначению.

В работе [223] дан исчерпывающий обзор распределительных устройств, применяемых в литевых машинах.

С внедрением электронного управления работой литевых машин достигнуты следующие успехи: сокращение времени включения; повышение точности включения; сокращение издержек и простота обслуживания; повышение надежности.

Анализ процессов литья под давлением показал, что управление и регулирование параметров машины имеет смысл вести по программе и таким образом оказывать воздействие на термодинамический процесс формования изделий.

При осуществлении управления процессом литья под давлением необходимо учитывать следующие обстоятельства: 1) во время пластикации должно быть принято зависимое от осевого перемещения червяка программирование давления подпора (пластикация); 2) в процессе заполнения формы (также зависящем от величины хода червяка-плунжера) необходимо запрограммировать такую скорость впрыска, которая была бы связана с конкретной конструкцией литевой формы; 3) переключение с процесса впрыска на процесс выдержки под давлением должно следовать в течение времени уплотнения расплава, в зависимости от давления в оформляющей полости литевой формы; 4) в соответствии с характеристикой литевой формы следует осуществлять зависимость от времени программу для операции выдержки под давлением.

В то время, как первое из перечисленных обстоятельств относится к главной стадии пластикации — переводу твердых полимеров в расплав, три остальные касаются формования изделий из расплава.

Многими исследователями было доказано, что три стадии формования характеризуются изменением давления во времени в оформляющей полости формы и определяют свойства готовых изделий [225].

Рис. 5.78 поясняет процессы, протекающие в литьевой форме [226] Для усовершенствования процесса литья наряду с непосредственным замером температуры расплава регистрировались значения давления в конце червяка (перед соплом). На практике применяются пьезоэлектрические датчики и тензометрические способы измерения. Оба принципа измерения были усовершенствованы, они могут быть применены как для динамических, так и для квазистатических измерений.

Характеристики принципов измерения и устройства различных датчиков приведены в работе [221].

ГЛАВА 6

Прессование реактопластов

Прессованием называется процесс обработки того или иного материала давлением с целью уплотнения или придания ему нужной формы. В отличие отковки и штамповки прессование производится при низких скоростях рабочего инструмента, поэтому к прессованию можно применять законы статики.

Основным фактором, обеспечивающим образование прочного изделия при прессовании, являются силы электростатического притяжения, которые вступают в действие при сближении отдельных частиц на расстояние 10^{-8} см. Процесс прессования начинается с перераспределения частиц и более плотной их упаковки. Повышение давления прессования приводит к увеличению поверхности контактов в результате хрупкой деформации частиц (появление новых контактных поверхностей) или вследствие их пластической деформации (увеличение площади соприкосновения).

С ростом давления прессования плотность и прочность изделия увеличиваются и при достаточно высоких давлениях могут достигать плотности и прочности компактного материала. При дальнейшем повышении давления прочность и плотность меняются незначительно. На этом этапе работа прессования будет в основном расходоваться на упругую деформацию пресуемого материала и инструмента.

В большинстве случаев компактный материал может быть получен также за счет плавления. Общую удельную работу W , затраченную на получение единицы массы компактного тела, можно представить как сумму тепловой энергии W_T , работы, затраченной на уплотнение W_p , и потенциальной энергии W_n :

$$W = W_T + W_p + W_n \quad (6.1)$$

Если тело получено путем плавления, то

$$W = W_T = A (Q_{np} + Q_T + Q_{\phi} \pm Q_p) \quad (6.2)$$

где A — механический эквивалент теплоты; $Q_{пп}$ — количество тепла, сообщенное материалу при предварительном подогреве; Q_t — количество тепла, сообщенное при нагреве до температуры плавления; Q_{ϕ} — теплота фазового перехода; Q_p — теплота реакции.

Под W_n понимается энергия взаимодействия между отдельными частицами прессуемого материала. В целях повышения производительности труда на прессе широко используется предварительный подогрев пресс-материала, производимый вне пресса. Чем выше температура предварительного подогрева, тем меньше времени требуется для нагрева материала в пресс-форме и, следовательно, короче цикл прессования.

Предварительный подогрев может производиться разными способами: в термошкафах, между нагретыми плитами, токами высокой частоты, в червячных пластикаторах и т. д. Температура предварительного подогрева выбирается с таким расчетом, чтобы оформление детали при прессовании произошло раньше, чем заметно снизится текучесть материала вследствие его отверждения.

6.1. КОНСТРУКЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕССОВ

Основным параметром, используемым для характеристики пресса, является номинальное усилие прессования. По типу станины прессы делятся на колонные, рамные и челюстные.

Колонные прессы бывают двух-, четырех- и многоколонными. Рамные и челюстные прессы могут быть двух- и многостоечными, при этом каждая из стоек вырезается из листового стального проката. В отдельных случаях станины рамных и челюстных прессов делают литыми из стали. Челюстные прессы применяются в тех случаях, когда при изготовлении изделий необходим доступ к пресс-форме с трех сторон.

По виду привода прессы делятся на механические, гидромеханические и гидравлические.

6.1.1. Механические прессы

К ним относятся винтовые, коленорычажные, эксцентриковые и ротационные прессы. Их целесообразно применять для изготовления мелких изделий при больших скоростях прессования, коротких выдержках и небольших усилиях прессования. При передаче больших усилий рабочие органы механических прессов становятся более громоздкими и металлоемкими, чем у гидравлических прессов. В промышленности пластмасс механические прессы нашли наибольшее применение для таблетирования пресс-материалов, а также в некоторых конструкциях прессов-автоматов.

6.1.2. Гидромеханические прессы

Они позволяют, используя рычажные механизмы, получить в начале рабочего хода большую скорость и небольшое усилие на рабочей плите, а в конце рабочего хода — большое усилие

Рис. 6.1. Схема силового нагружения колонного гидравлического пресса.

при небольшой скорости. Такое распределение скоростей и усилий прессования позволяет при постоянном расходе рабочей жидкости определенного давления и простой схеме управления обеспечить высокую производительность пресса. Однако гидромеханические прессы дороже и конструктивно сложнее, чем гидравлические.

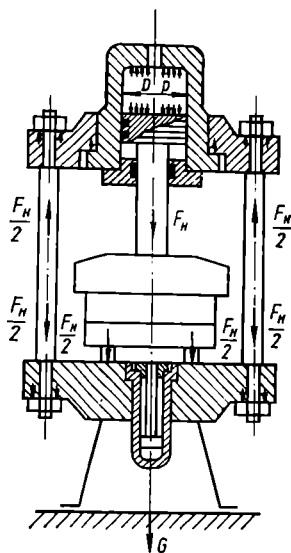
6.1.3. Гидравлические прессы

Они имеют ряд преимуществ по сравнению с механическими и гидромеханическими прессами: обеспечивают возможность определять и в широких пределах регулировать усилие прессования, позволяют регулировать величины и скорости рабочего хода, а также осуществлять выдержку под давлением и ее регулирование.

В гидравлических прессах обеспечивается независимость величины усилия прессования от хода пресса, отсутствует жесткая связь пресса с приводом.

Основными частями гидравлического пресса являются: станина; рабочие, возвратные и выталкивающие цилиндры и плунжеры; подвижные и неподвижные плиты. Для обеспечения работы гидравлического пресса необходимо иметь гидропривод и распределители жидкости, связанные с прессом трубопроводами. Гидравлические прессы делятся на прессы с верхним и нижним расположением рабочего цилиндра. Прессы с верхним расположением рабочего цилиндра преимущественно применяются для переработки термореактивных пластмасс. Прессы с нижним расположением рабочего цилиндра в основном применяются для прессования слоистых пластиков (этажные прессы) и резиновых изделий в съемных пресс-формах.

На рис. 6.1 показана схема силового нагружения гидравлического пресса. Жидкость под давлением p поступает от гидроагрегата или насосно-аккумуляторной станции в рабочий цилиндр. Давление жидкости распространяется во все стороны равномерно. Давление, действующее на стенку цилиндра, должно учитываться при его прочностном расчете. На плунжер и на дно цилиндра действуют силы, равные по величине и противоположные по направлению:



$$F_H = \frac{\pi D^2}{4} p \quad (6.3)$$

где $F_{\text{н}}$ — номинальное усилие пресса; D — диаметр плунжера; p — давление рабочей жидкости.

Номинальным усилием пресса называется усилие прессования без учета различных потерь (на трение в уплотнениях и направляющих, на противодействие в возвратной полости цилиндра, на преодоление веса подвижных частей и т. д.).

Усилие от плунжера последовательно передается на подвижную плиту, пресс-форму и нижнюю неподвижную плиту. Под действием давления жидкости главный цилиндр стремится подняться вверх, при этом усилие $F_{\text{н}}$ через фланец передается на верхнюю неподвижную плиту (поперечину, или архитрав). Верхняя и нижняя плиты связаны между собой колоннами. Таким образом, как усилие прессования, так и реакции, возникающие в процессе прессования, воспринимаются деталями станины пресса, а на фундамент действует только вес пресса.

Из рис. 6.1 легко установить характер нагружения отдельных деталей: поперечины работают на изгиб, колонны — на растяжение, плунжер — на сжатие и продольный изгиб и т. д.

В прессах с нижним рабочим цилиндром возврат рабочей плиты в нижнее положение может осуществляться под действием собственного веса (например, в этажных прессах).

В прессах с верхним или горизонтальным расположением рабочего цилиндра, а также в тех случаях, когда обратный ход плиты нужно осуществить быстро (в прессах с нижним расположением рабочего цилиндра), применяют принудительный обратный ход. Принудительный обратный ход может осуществляться при помощи возвратных (ретурных) плунжеров и цилиндров или при помощи ступенчатых (дифференциальных) рабочих плунжеров. В прессах с одним возвратным цилиндром последний располагают соосно с рабочим цилиндром. Два возвратных цилиндра во избежание перекосов располагают по диагонали или по средней линии пресса.

Конструкции прессов с дифференциальными плунжерами компактнее и менее металлоемки. Однако применение дифференциальных плунжеров требует шлифовки внутренней поверхности цилиндра на всю длину рабочего хода и применения надежной системы подвижных уплотнений, так как для замены уплотнений дифференциальных плунжеров их приходится вынимать из цилиндра. Кроме того, при верхнем расположении рабочего цилиндра с дифференциальным плунжером в случае отрыва плиты от плунжера или разрыва трубопровода, подводящего жидкость к ретурной (возвратной) полости, может произойти падение подвижной плиты, что в свою очередь может вызвать поломку пресс-формы и несчастный случай.

В соответствии с ГОСТ 8200—80 гидравлические прессы с индивидуальным и групповым приводом, предназначенные для прессования изделий из пластмасс, выпускаются с номинальными усилиями: 100 (10), 160 (16), 250 (25), 400 (40), 630 (63), 1000 (100), 1600 (160), 2500 (250), 4000 (400), 6300 (630) кН (тс).

Для каждого из указанных типоразмеров регламентируются следующие параметры: ход подвижной плиты, наибольшее расстояние между неподвижной и подвижной плитами пресса, размеры плит, номинальное усилие выталкивателя, ход выталкивателя и скорость подвижной плиты при холостом, рабочем и возвратном ходах, скорость выталкивателя при движении вверх. Кроме того, этим ГОСТом регламентируется удельная материалоемкость (без средств автоматизации) в $\text{кг}/(\text{кН}\cdot\text{м}^3)$, которая определяется как отношение массы пресса к произведению номинального усилия на ход подвижной плиты и площадь стола.

6.2. УПЛОТНЕНИЯ

Уплотнения являются необходимой и ответственной частью всех гидравлических машин. Они должны исключать или сводить к минимуму утечки рабочей жидкости и предотвращать попадание во внутреннюю полость гидравлических систем пыли, абразивное действие которой может привести к преждевременному износу трущихся поверхностей рабочих органов. Уплотнительные устройства делятся на уплотнения неподвижных и подвижных соединений. В свою очередь устройства для уплотнения подвижных соединений делятся на уплотнения деталей вращения и уплотнения деталей с возвратно-поступательным движением. По характеру взаимодействия с уплотняемыми деталями все уплотнения делятся на контактные и бесконтактные. Контактные уплотнения осуществляют герметизацию за счет плотного прилегания к поверхности сопрягаемых деталей.

Контактные уплотнения (сальники, манжеты, упругие неразрезные и поршневые кольца и др.) обеспечивают высокую надежность герметизации. Однако при движении вследствие трения происходит износ как уплотнений, так и герметизируемых поверхностей, что ограничивает срок их службы. Кроме того, на преодоление сил трения расходуется значительная энергия.

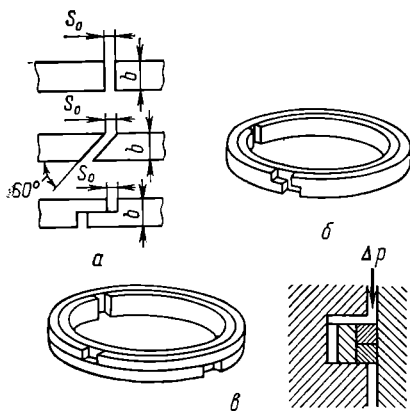
Ниже рассматриваются уплотнения, наиболее часто применяемые в прессах.

6.2.1. Поршневые кольца

Они служат для создания уплотнений между зеркалом цилиндра и поршнем, совершающим возвратно-поступательное движение. Поршневые кольца (рис. 6.2) широко применяются в компрессорах, насосах, распределительных устройствах, а также для уплотнения поршневой части дифференциальных плунжеров рабочих и вспомогательных цилиндров гидравлических прессов, литьевых и других машин. Использование поршневых колец особенно целесообразно в тех случаях, когда в связи с большими скоростями движения и маленькой выдерж-

Рис. 6.2. Поршневые кольца:

а — схемы стыков (замков) поршневых колец; б — двойное поршневое кольцо; в — строенное поршневое кольцо.



кой под давлением потери через замки поршневых колец незначительны, а в связи с нагревом за счет трения применение манжет становится нежелательным. Поршневые кольца имеют прямоугольное сечение, они монтируются на поршне, в котором делают для этого специальные канавки.

Начальное уплотнение цилиндрической поверхности

поршневого кольца происходит только за счет его собственной упругости. В уплотнениях, работающих при низком давлении рабочей жидкости, рекомендуется выбирать удельное давление кольца на зеркало цилиндра равным 0,03—0,07 МПа, а при высоком давлении — 0,07—0,15 МПа.

Давление рабочей жидкости прижимает кольцо к боковой поверхности канавки и, разжимая кольцо, увеличивает его давление на зеркало цилиндра. Поршневые кольца изготавливаются из ковanej бронзы, перлитного чугуна с высокими механическими и антифрикционными показателями и стали. В некоторых случаях применяют графит или фторопласт. Желательно подобрать материал колец так, чтобы он составил с цилиндром и поршнем антифрикционную пару.

Изготовление поршневых колец обычно складывается из следующих операций: трубчатая заготовка нужного диаметра и длины, соответствующей возможностям наличного оборудования, протачивается и растачивается, а затем разрезается на кольца; фрезеруются замки, шлифуются под размер торцы колец; в специальной оправке кольца обтачиваются под размер, производится окончательная шлифовка замков. Готовые поршневые кольца проверяются по геометрическим размерам, чистоте обработки поверхности и упругости.

При назначении геометрических размеров колец можно руководствоваться следующими рекомендациями. Радиальная толщина колец t выбирается, исходя из соотношения $D/t = 20 \div 30$, где D — диаметр цилиндра. Зазор в замке собранного кольца при комнатной температуре $S_0 = 0,1 \div 0,6$ мм (выбранное значение зазора следует проверить путем расчета на удлинение от максимально возможного при работе нагрева). Ширина кольца $b = (1 \div 1,2)t$.

С целью увеличения гидравлического сопротивления движению жидкости при протекании через замок, а следовательно, и уменьшения утечек, применяют поршневые кольца с косым

замком. Значительное уменьшение утечек может быть достигнуто при применении поршневых колец со ступенчатым замком (рис. 6.2, а). Однако и через такие кольца утечка все же происходит за счет вытекания через зазор в радиальном направлении. Иногда для уменьшения утечки применяют сдвоенные (рис. 6.2, б) и строенные (рис. 6.2, в) поршневые кольца.

Уплотнения поршневыми кольцами могут состоять из одного или нескольких колец. При установке нескольких колец замки смежных колец должны находиться на диаметрально противоположных сторонах поршня, за счет чего увеличивается длина пути утечек. Чтобы кольца не могли перемещаться вокруг оси поршня, применяют фиксаторы.

В пневматических машинах, работающих под давлением до 0,5—0,6 МПа, обычно устанавливают два кольца. В гидравлических машинах, работающих под давлением до 32 МПа, применяют от 3 до 8 колец.

6.2.2. Упругие неразрезные (резиновые) кольца

Они нашли широкое применение для уплотнения деталей, имеющих возвратно-поступательное движение. На рис. 6.3 показаны основные конструкции уплотнительных колец. Наибольшее распространение получили О-образные кольца (рис. 6.4), которые могут уплотнять в двух направлениях. Они применяются при возвратно-поступательном и вращательном движении и устанавливаются в канавках прямоугольной формы (рис. 6.4, а). Кольцо при установке подвергается диаметальному сжатию с силой, соответствующей примерно 10% от усилия, которое будет действовать на него во время работы (рис. 6.4, б). При движении поршня кольцо, упруго деформируясь под влиянием перепада давления, обеспечивает уплотнение (рис. 6.4, в). При изменении направления движения рабочей жидкости происходит перемещение кольца и прижатие его к другой стенке канавки.

Размеры уплотняемых деталей, канавок, зазоров, колец и чистота обработки уплотняемых деталей стандартизированы.

Кольца круглого сечения рекомендуются для уплотнений, работающих при давлениях до 20 МПа. Х-образные кольца с четырьмя округлыми ребрами можно устанавливать в обычную канавку под О-образное кольцо. Область применения и условия работы те же, что и у О-образных колец, но Х-образные кольца не подвержены спиральному скручиванию, поэтому их

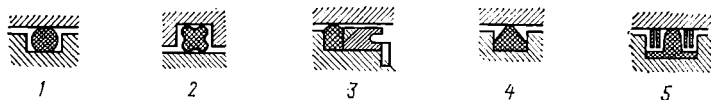


Рис. 6.3. Упругие неразрезные резиновые кольца:

1 — О-образные; 2 — Х-образные; 3 — D-образные; 4 — Δ-образные; 5 — Т-образные.

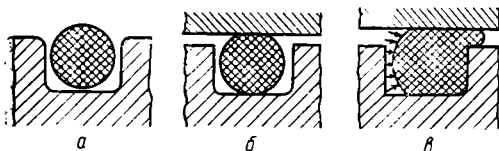


Рис. 6.4. Схема установки и работы О-образного кольца:

а — установка кольца в канавку поршня; *б* — радиальная деформация кольца при установке плунжера в цилиндр; *в* — деформация кольца в процессе работы.

можно применять для уплотнения вращающихся валов. D-образные кольца могут хорошо служить для уплотнения штоков при возвратно-поступательном движении. При монтаже необходимы подкладные кольца, которые исключают выдавливание кольца в зазор при высоких давлениях. Т-образные кольца не подвержены спиральному скручиванию. Могут применяться как при вращательном, так и при возвратно-поступательном движении. Для работы Т-образного кольца необходимы подкладные металлические кольца, которые исключают выдавливание кольца в зазор; рекомендуются для работы под высоким давлением. Δ-образные кольца имеют в поперечном сечении форму треугольника. В связи с высоким трением срок службы невелик, применяются относительно редко.

При установке упругих колец необходимо предусмотреть входную фаску и закруглить кромки, иначе при сборке кольцо может быть защемлено или подрезано. Более плотная посадка колец способствует повышению эффективности уплотнения, но увеличивает трение и снижает срок службы (см. ГОСТ 9833—73). Удлинить срок службы уплотнения можно за счет высокой чистоты обработки (9—10 класс шероховатости) канавки и рабочих поверхностей, по которым перемещается кольцо. В целях уменьшения выдавливания упругого кольца в зазор могут быть использованы подкладные шайбы из металла, пластика или кожи.

6.2.3. Манжетные уплотнения

Они являются наиболее распространенными устройствами для уплотнения подвижных частей в гидравлических прессах. В зависимости от конструкции и назначения манжеты делятся на воротниковые (U-образные), полуворотниковые (V-образные или шевронные), манжеты штока и поршневые манжеты.

Манжетные уплотнения могут работать под внутренним давлением, когда манжета прижимается жидкостью к уплотняемой поверхности. В тех случаях, когда уплотнение должно быть двухсторонним (дифференциальный плунжер), ставится не менее двух манжет, обращенных своим основанием друг к другу.

За счет собственной упругости или расклинивающего действия манжетодержателя создается предварительное прижатие борта манжеты к уплотняемой поверхности. Герметичность во время работы обеспечивается за счет расклинивающего действия рабочей жидкости.

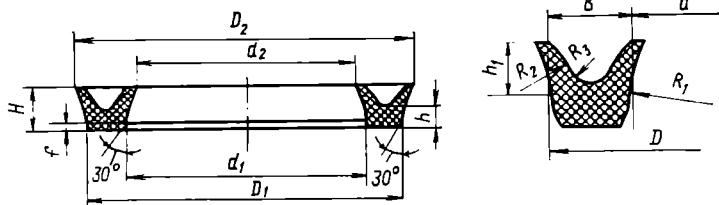


Рис. 6.5. Манжета воротниковая резиновая.

Манжетное уплотнение является самоуплотняющимся с самоуплотняющей силой прижатия, зависящей от рабочего давления.

Манжеты изготавливаются из различных сортов резины, прорезиненной ткани, полиамидов, поливинилхлоридных пластиков и других полимерных материалов, а также из кожи. Манжеты из пластмасс и резины изготавливаются горячим прессованием или литьем под давлением.

На рис. 6.5 показана конструкция резиновой воротниковой манжеты; все размеры манжеты, обозначенные на рисунке буквами, лимитируются ГОСТ 6969—54.

Описываемые манжеты имеют плоское основание, что упрощает конструкцию нажимного кольца и пресс-формы для изготовления манжет, а главное, уменьшает возможность разрыва основания манжеты, так как все элементы ее подвергаются в основном деформации сжатия. Борта манжеты имеют треугольную форму, при этом вершины треугольника (усы) разведены в разные стороны. Такая конфигурация обеспечивает хорошее уплотнение даже при низком давлении рабочей жидкости.

Манжеты шевронные многорядные (ГОСТ 9041—59) изготавливаются из хлопчато-бумажной ткани «домостик», с двух сторон пропитанной графитно-резиновой смесью. Рабочая высота отдельно взятой шевронной манжеты недостаточна для обеспечения герметичности, поэтому манжеты этого типа используются в виде пакета, набранного из нескольких манжет (от 3 до 10). Обычно шевронные манжеты используются совместно с кольцом в манжету (опорное кольцо) и кольцом на манжету (нажимное кольцо), изготовленными из того же материала, что и манжеты, либо из бронзы или пластмассы (рис. 6.6). Шевронные манжеты рекомендуются на давление до 50 МПа.

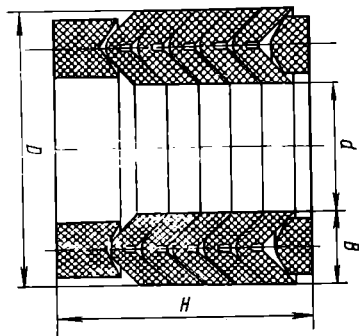


Рис. 6.6. Шевронные манжеты.

При расчете эффективной мощности пресса необходимо определить силу, затрачиваемую на преодоление трения в уплотняющих элементах. Пренебрегая собственной упругостью манжет, которая в большинстве случаев ничтожна по сравнению с давлением рабочей жидкости, определим силу трения в уплотнениях по формуле

$$F = \pi D h f p \quad (6.4)$$

где D — диаметр плунжера; h — высота рабочей части манжеты; f — коэффициент трения; p — давление внутри цилиндра.

Коэффициент трения по стали при работе на воде для кожи — 0,06—0,13; для резины и прорезиненной ткани — 0,01—0,1; для полиамида П-68 — 0,09; для капрона — 0,09—0,1.

Следует иметь в виду, что теплостойкость манжет невелика: кожаные манжеты растительного дубления рекомендуется применять при температуре до 40 °С, хромового — до 70, резиновые — до 80, поливинилхлоридные — до 60 °С.

6.3. ПРИВОД ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕССОВ

Первичным механизмом привода гидравлических прессов является насос, преобразующий механическую энергию, получаемую от электродвигателя, в потенциальную или кинетическую энергию рабочей жидкости.

Кроме насоса для обеспечения работы пресса необходимо иметь распределительные, регулирующие и предохранительные устройства, связанные между собой и с рабочей машиной в необходимой последовательности.

В ряде случаев используются накопители рабочей жидкости, находящиеся под давлением (аккумуляторы), а также мультипликаторы, служащие для повышения давления рабочей жидкости.

Различают следующие основные типы привода гидравлических прессов: 1) насосный (индивидуальный); 2) насосно-аккумуляторный (групповой или индивидуальный); и 3) мультипликаторный в сочетании с насосным или насосно-аккумуляторным.

Под групповым приводом понимается такой привод, который обеспечивает одновременную (независимую) работу большого числа прессов (до нескольких сот).

В большинстве случаев гидравлические прессы должны иметь повышенную скорость холостого и обратного ходов при незначительном усилии, развиваемом в это время прессом, которое необходимо только для преодоления сил трения, веса подвижных частей и гидравлических сопротивлений. При рабочем ходе, когда развивается максимальное усилие прессования, скорость понижается. Такой режим работы пресса может быть

достигнут при помощи разных технических средств, из которых наиболее часто применяются: использование рабочей жидкости от двух или более источников с разным давлением (групповой индивидуальный привод); плавное изменение подачи и давления рабочей жидкости (индивидуальный привод); вспомогательные цилиндры ускоренного хода (групповой и индивидуальный привод); мультипликаторы (групповой и индивидуальный привод).

Индивидуальный насосный гидропривод состоит из одного или нескольких насосов, приводимых в движение электродвигателями, бака для рабочей жидкости, трубопроводов и арматуры, гидро- и электроаппаратуры, приборов управления и рабочей жидкости.

Гидро- и электроаппаратура должна обеспечивать дистанционное управление гидроприводом, а также автоматическое поддержание нужного давления и подачи. Зная диаметр плунжера пресса D (м) и скорость его движения V (м/с), определим необходимую теоретическую производительность насоса Q_T (м³/с):

$$Q_T = \frac{\pi D^2}{4} v \quad (6.5)$$

Для учета утечек, сжатия жидкости и расширения стенок цилиндра и трубопроводов введем в формулу коэффициент 1,2. Расчетная формула для производительности примет тогда следующий вид:

$$Q = \frac{1,2\pi D^2}{4} v = 0,942 D^2 v \quad (6.6)$$

Работа A (кН·м), производимая прессом при прессовании, может быть представлена как

$$A = FS \quad (6.7)$$

где F — усилие, развиваемое прессом, (кН); S — путь прессующего инструмента (м).

Для установления зависимости значения затрачиваемой мощности P (кВт) от усилия прессования и скорости рабочего инструмента, выразим в формуле $P=A/t$ работу через путь и скорость:

$$P = FS/t = Fv \quad (6.8)$$

Для определения мощности электродвигателя P_d (кВт) вводим среднее значение к.п.д. насоса и редуктора $\eta=0,75$:

$$P_d = P/\eta = Fv/0,75 \quad (6.9)$$

Пользуясь этой формулой, можно при заданном усилии и скорости прессования определить необходимую мощность привода пресса.

В качестве насосов низкого давления (до 7 МПа) применяют пластинчатые, шестеренчатые, червячно-винтовые и кри-

вошипно-плунжерные насосы. Для получения рабочей жидкости высокого давления (свыше 10 МПа) в основном применяются плунжерные насосы, которые могут быть разделены на три группы: кривошипно-плунжерные, эксцентриково-плунжерные и ротационно-плунжерные.

Насосно-аккумуляторный привод может применяться как для индивидуального, так и (главным образом) для группового привода прессов. В периоды, когда потребление рабочей жидкости меньше, чем производительность насосов, аккумулятор заполняется рабочей жидкостью, находящейся под давлением. В то время, когда потребление рабочей жидкости цехом (машиной) больше, чем производительность насоса, аккумулятор отдает часть жидкости, находящейся под давлением, в гидравлическую магистраль. В зависимости от способа поддержания давления в аккумуляторах они делятся на грузовые, воздушно-беспоршневые, воздушно-поршневые, пружинные. Основными параметрами гидравлических аккумуляторов является номинальное давление рабочей жидкости и емкость (ГОСТ 14064—68).

При прочностном расчете сосудов гидроаккумуляторов принимается не менее чем трехкратный запас прочности. Насосно-аккумуляторный привод может работать на воде, водной эмульсии и минеральных маслах. При применении воздушно-беспоршневых аккумуляторов во избежание образования взрывоопасной смеси капель масла в воздухе работают не на масле, а на водной эмульсии, при использовании же минеральных масел аккумулятор заполняют азотом.

6.4. ПРЕССЫ, СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПО НАЗНАЧЕНИЮ

6.4.1. Угловые прессы

Для прессования изделий сложной конфигурации иногда требуются пресс-формы, имеющие разъем в двух плоскостях: вертикальной и горизонтальной. Для прессования изделий в

таких формах применяются угловые прессы. Угловой пресс (рис. 6.7) состоит из двух рабочих гидравлических цилиндров 1, 2 и плунжеров, расположенных под углом 90°. Замыкающий цилиндр 2 с горизонтальной осью обеспечивает смыкание формы между подвижной 4 и неподвижной 5 вертикальными плитами.

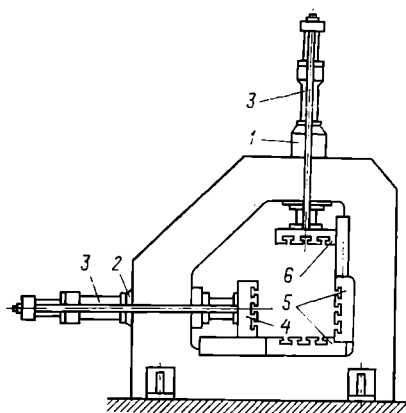


Рис. 6.7 Угловой пресс:

1 — рабочий цилиндр и плунжер; 2 — замыкающий цилиндр и плунжер; 3 — возвратные цилиндры; 4 — подвижная вертикальная плита; 5 — неподвижные плиты; 6 — рабочая плита.

В замкнутую пресс-форму (на рисунке не показана) загружается пресс-материал, и дальнейшее формирование ведется как на обычном вертикальном прессе. Плита 6, несущая пуансон, опускается под действием цилиндра 1 и производит прессование изделия. Возврат подвижных плит 4 и 6 производится при помощи возвратных (ретурных) цилиндров 3, а также соответствующих плунжеров и тяг.

Угловые прессы могут эксплуатироваться с групповым и индивидуальным приводами.

6.4.2. Этажные прессы

Этажные прессы служат для прессования листовых материалов (текстолит, стеклотекстолит, гетинакс, древесные пластики, СВАН, винипласт, целлулоид и др.). Этажные прессы (рис. 6.8) всегда имеют нижнее расположение рабочего цилиндра. При больших размерах работ плит с целью более равномерной передачи на них усилия прессования и для уменьшения диаметра рабочего цилиндра применяются два или несколько цилиндров.

Цилиндры пресса большей частью изготавливаются литыми из стали. Плунжеры 7, 9 — чугунные или стальные. Уплотнение достигается при помощи манжет. При больших диаметрах плунжеров используются закладные манжеты.

Возврат подвижных частей в нижнее положение происходит под действием их собственного веса. Питание рабочей жидкостью может производиться как от индивидуального, так и от группового привода. При приводе на одном высоком давлении прибегают к вспомогательным цилиндрам 8 ускоренного хода, которые обеспечивают подъем и смыкание плит, а главный цилиндр 10 в это время заполняется жидкостью самотеком через наполнительный клапан. Прессование происходит при переключении главного цилиндра на высокое давление. Станины этажных прессов бывают колонного и рамного типов. Архитрав 2 и подвижные плиты 6 изготавливаются сварными или литыми из стали. Детали станины и подвижный стол должны обладать повышенной жесткостью, так как иначе при больших размерах стола пресса, достигающих 1500×3000 мм и более, возможно получение брака при прессовании из-за разнотолщинности листа.

Между нижней греющей плитой, лежащей на подвижном столе, и верхней, прикрепленной к архитраву, монтируются промежуточные греющие плиты 5. Количество промежуточных плит определяет этажность пресса. Очевидно, что усилие, создаваемое рабочим цилиндром, передается на все этажи, и, следовательно, все пакеты слоистого материала прессуются в одинаковых условиях. Увеличение числа этажей пресса ведет к повышению прессосъема. Однако повышение этажности осложняет механизацию загрузки заготовок и выгрузки готовых

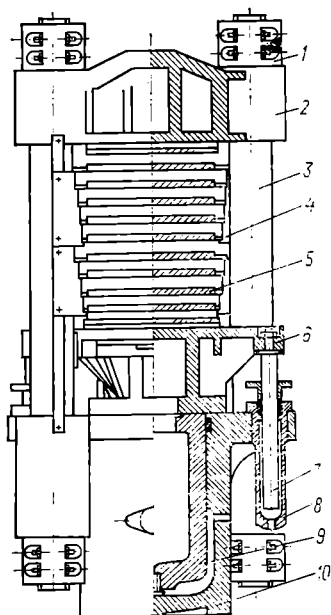


Рис. 6.8. Этажный гидравлический пресс:

1 — разрезная гайка; 2 — верхняя перекаладина (архитрав); 3 — колонна; 4 — ступенчатая рейка; 5 — плита; 6 — рабочий стол (нижняя перекаладина); 7 — плунжер ускоренного хода; 8 — цилиндр ускоренного хода; 9 — рабочий плунжер; 10 — рабочий цилиндр.

листов, а также приводит к увеличению рабочего хода пресса. Поэтому этажность пресса определяется технико-экономическими соображениями и редко превышает 25 этажей. Одинаковое расстояние между плитами в разомкнутом состоянии обеспечивает упорами лестничного типа 4 или цепным устройством.

Пропитанные связующим листы наполнителя укладываются в пакеты нужной толщины. Для получения глянцевой поверхности листы пластика прокладываются стальными полированными листами. Пакеты закладываются между плитами пресса. Зазор между разомкнутыми

плитами должен быть несколько больше высоты пакеты пресуемого материала в свободном (несжатом) состоянии.

Величина оптимального давления прессования зависит от свойств связующего и наполнителя. При давлении ниже оптимального получается пластик с рыхлой структурой, при слишком высоком давлении может произойти отжатие связующего. В обоих случаях физико-механические свойства слоистого пластика ухудшаются. Температура прессования также зависит от характера связующего, его содержания и природы наполнителя. В начале процесса прессования плиты пресса должны подогреться, а в конце, чтобы избежать коробления листов пластика, приходится прибегать к охлаждению. Поэтому наиболее удобно обогреть плиты паром или перегретой водой, а охлаждать водой, используя для нагрева и охлаждения одни и те же каналы, просверленные в нагревательных плитах. Конструкция нагревательных плит должна обеспечивать равномерный нагрев по ширине плит, так как неравномерный нагрев ухудшает внешний вид и физико-механические свойства пластика. Скорость прогрева внутренних слоев пресуемого материала очень мала вследствие низкой теплопроводности пропитанного наполнителя. В первой стадии прессования рекомендуется поддерживать температуру, лишь на 10—15° превышающую температуру плавления смолы, т. е. значительно ниже температуры, требуемой для быстрого отверждения, так как иначе может произойти неодновременное расплавление и полимеризация смолы на

поверхности и в середине пакета, что может привести к внутренним напряжениям и короблению прессованного изделия.

Подвод пара или воды от неподвижного коллектора к подвижным плитам пресса может осуществляться при помощи телескопического устройства, трубками с шарнирными соединениями, толстостенными шлангами из теплостойкой резины или упругими бронзовыми трубками, свернутыми змеевиком.

Продолжительность прессования зависит от скорости отверждения связующего при оптимальной температуре прессования. Недостаточная продолжительность прессования приводит к тому, что готовый пластик коробится и сильно поглощает влагу. Чрезмерная продолжительность прессования может привести к разрушению связующего и наполнителя, а следовательно, к ухудшению физико-механических свойств материала.

6.4.3. Прессы для профильного прессования

Непрерывным профильным прессованием получают изделия постоянного сечения и практически неограниченной длины путем продавливания материала через профилирующий инструмент.

В зависимости от конструкции профилирующего инструмента профильным прессованием можно получать как сплошные, так и полые изделия разнообразной формы: трубы, двутавровые, коробчатые, швеллерные и другие изделия.

Профильное прессование производится обычно на специальных горизонтальных гидравлических профильных прессах (штранг-прессах).

При переработке термореактивных материалов (рис. 6.9) длина мундштука должна быть выбрана с таким расчетом, чтобы материал успевал отвердеть за время прохождения через

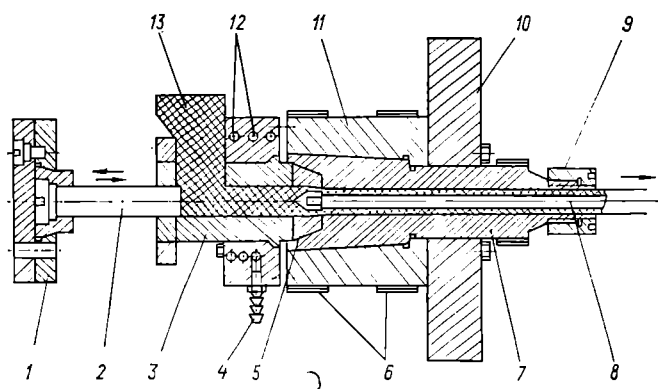


Рис. 6.9. Схема пресс-формы для профильного прессования:

1 — фланец крепления плунжера; 2 — плунжер; 3 — загрузочная камера; 4 — штуцер для подвода охлаждающей воды; 5 — дорнодержатель; 6 — обогрев электрический; 7 — матрица; 8 — дорн; 9 — мундштук; 10 — фланец; 11 — обойма; 12 — каналы охлаждения; 13 — бункер.

мундштук. Материальный плунжер пресса имеет возвратно-поступательное движение с наибольшей длиной хода и автоматическим переключением с рабочего на холостой ход. Пресс-материал из бункера просыпается при холостом ходе пресса в материальный цилиндр, а при рабочем ходе продавливается вдоль цилиндра. При этом новые порции материала наращиваются на ранее полученный профиль в мундштуке и выдавливают из свободного мундштука очередной участок готового изделия. Таким образом, при каждом рабочем ходе плунжера профильного пресса, осуществляемом через заданные промежутки времени, в матрицу подаются необходимые порции пресс-материала, а из открытого конца мундштука выдавливаются новые участки профильного изделия.

Для поддержания постоянной температуры материального цилиндра и мундштука используется обогрев паром, перегретой водой, электричеством, а также охлаждение водой или обдув воздухом. Зона загрузки из бункера в цилиндр должна охлаждаться во избежание образования пробки и прилипания ее к плунжеру, что нарушило бы загрузку.

Давление на материал в цилиндре и в мундштуке зависит от сопротивлений, возникающих при перемещении материала, и возрастает от нуля на выходе из мундштука до максимального значения на торце материального плунжера (удельное давление прессования), которое для отдельных материалов может достигать 100—200 МПа.

6.4.4. Прессовые линии с выносными пресс-формами

При прессовании толстостенных изделий из реактопластов значительную часть технологического цикла занимает время выдержки под давлением. Известно, что в период выдержки под давлением удельное давление в пресс-форме может составлять примерно 10% от удельного давления прессования, т. е., выдержку можно проводить вне пресса, поддерживая тем или иным способом нужное давление в пресс-форме. Указанная задача решается при помощи линии непрерывного прессования с выносными формами [186]. Линия состоит из двух гидравлических прессов, шагового транспортера и набора пресс-форм. Каждая пресс-форма оборудована замком и пружинными устройствами, которые поддерживают в закрытой пресс-форме заданное давление. Открытая, освобожденная от изделий и очищенная пресс-форма перемещается транспортером в позицию загрузки. Загрузка формы может производиться пресс-порошком или таблетками, предварительно нагретыми токами высокой частоты. Затем форма перемещается на гидравлический пресс. В этой позиции происходит прессование и запираение формы. Дальнейшее перемешивание, во время которого происходит отверждение изделия, форма совершает в замкнутом состоянии. После оконча-

ния выдержки форма подходит ко второму прессу, который открывает замки и раскрывает пресс-форму. Далее происходит съем изделия и чистка формы.

6.5. ПРЕССЫ-АВТОМАТЫ И РОТОРНЫЕ ЛИНИИ

Существует несколько признаков, по которым производится классификация прессов-автоматов. По виду привода они делятся на механические, гидромеханические и гидравлические; по количеству производимых операций — на одно-, двух-, трех- и четырехоперационные [187].

Однооперационные presses-автоматы выполняют только операцию прессования, двухоперационные — таблетирование или предварительный нагрев материала и его прессование; трехоперационные — таблетирование, нагрев таблеток и прессование; четырехоперационные — таблетирование, нагрев таблеток, прессование, обработку заусенцев у отпрессованных изделий.

В настоящее время назрела необходимость создания прессов-автоматов, которые наряду с перечисленными операциями осуществляли бы еще контроль качества и упаковку изделий.

Каждая операция может состоять из ряда переходов. Например, операция прессования состоит из следующих переходов: загрузки пресс-порошка, собственно прессования, выталкивания, съема готового изделия.

По числу позиций presses-автоматы разделяются на одно- и многопозиционные.

В зависимости от перемещений рабочих органов пресса и прессуемых изделий различают presses:

- с шибберным (кассетным) питателем (пуансон совершает возвратно-поступательное движение вдоль вертикальной оси машины, загрузочное устройство кассетного типа и сбрасывающее устройство совершают возвратно-поступательное движение в плоскости, перпендикулярной оси пресса);

- с выносными пресс-формами (два однопозиционных пресса обслуживают комплект пресс-формы; которые перемещаются транспортером пульсирующего действия, проходя последовательно позиции загрузки пресс-материала, прессования, выдержки под давлением в замкнутой пресс-форме, раскрытие формы и съем изделия);

- presses-автоматы револьверного типа (загрузочные и разгрузочные приспособления неподвижны; комплект силовых цилиндров и пресс-инструмента, расположенный на роторе, совершает пульсирующее вращательное движение);

- роторные линии (все транспортные операции совмещаются с производственными: дозирование, таблетирование, предварительный подогрев, прессование, обработка готовых изделий совершаются на соответствующих непрерывно вращающихся роторах).

По методу нагрева или пластикации пресс-материала перед прессованием различают presses-автоматы без предварительного

подогрева; с низкотемпературным предварительным подогревом (теплым воздухом, инфракрасным облучением); с предварительным подогревом токами высокой частоты; с предварительной червячной пластикацией.

Полная автоматизация процесса производства прессовых изделий должна охватывать не только собственно процесс прессования, но и все подготовительные и заключительные технологические и транспортные операции. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют роторные линии.

Часовую производительность пресса-автомата в штуках можно определить по формуле

$$Q = \frac{60}{T_{\text{ц}}} n m \beta$$

где $T_{\text{ц}}$ — продолжительность одного полного цикла (мин); n — число позиций; m — гнездность пресс-формы; β — коэффициент использования пресса ($\beta < 1$).

Автоматы оснащают приборами для управления всеми рабочими органами, регулирования и контроля температуры нагрева пресс-формы, продолжительности отдельных операций и цикла прессования. При этом обеспечивается возможность изменения технологического режима прессования в широких пределах. Прессы-автоматы некоторых конструкций снабжены приборами контроля за своевременностью удаления готовых изделий из пресс-форм.

Прессы-автоматы, работающие без предварительного подогрева, целесообразно использовать для изготовления тонкостенных изделий из материалов с повышенной скоростью отверждения. Очень важно для устойчивости работы пресса-автомата постоянство свойств сырья, на котором он работает. Пресс-материал должен обладать стабильными текучестью и скоростью отверждения, содержать достаточное количество смазывающих веществ, необходимых для облегчения удаления изделий и облоя из пресс-форм в автоматическом режиме. Очень большое значение для стабильной работы пресса-автомата, работающего на порошке, имеет постоянство его гранулометрического состава.

Рассмотрим основные конструктивные особенности некоторых наиболее распространенных типов прессов-автоматов.

6.5.1. Однооперационный однопозиционный пресс-автомат

При создании прессов-автоматов широко используется принцип агрегатирования (рис. 6.10). За основу принимается базовый пресс-полуавтомат соответствующего типоразмера с увеличенной рабочей скоростью подвижной плиты и выталкивателя. Пресс-автомат, работающий на неподогретом порошке, создается агрегатированием базового пресса с устройствами для за-

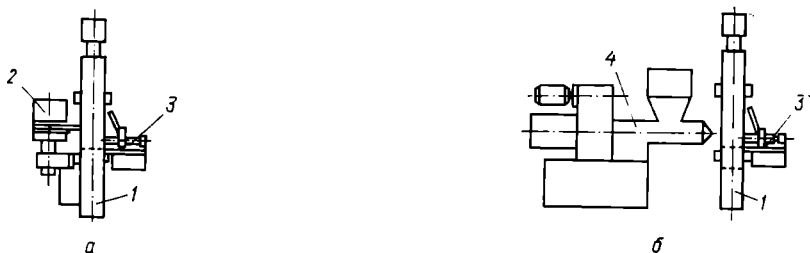


Рис. 6.10. Схема агрегатирования пресс-автомата (а, б — см. текст):
1 — базовая модель пресса; 2 — устройство для загрузки пресс-порошка; 3 — съемное устройство; 4 — пластикационное устройство.

грузки пресс-порошка и механизмом съема изделий (рис. 6.10, а). Базовая модель пресса представляет собой вертикальный гидравлический пресс рамной конструкции с верхним расположением рабочего цилиндра и двумя возвратными цилиндрами. Устройство для загрузки (рис. 6.11) состоит из неподвижного бункера 1, установленного за прессом на консолях. Под бункером находится подвижная плита — дозатор 2, в которой имеются цилиндрические отверстия, совпадающие с расположением гнезд в пресс-форме. Размеры отверстий соответствуют необходимому размеру дозирования. Отверстия в плите снизу перекрыты металлической пластиной 3 с такими же отверстиями. Плита перемещается и останавливается над пресс-формой 4, при этом нижняя пластина сдвигается, отверстия в плите и пластине совмещаются, и материал просыпается в пресс-форму. Устройство перемещается специальным гидравлическим цилиндром, плунжером и промежуточными передачами. Рабочей частью механизма съема изделий (рис. 6.12) является вилка 4, которая останавливается под отпрессованными изделиями 3, вытолкнутыми из пресс-формы 1. Каждое изделие располагается над двумя зубьями вилки. Выталкиватель опускается, после чего отводится вилка из-под пресса штоком 5, и, наклоняясь, сбрасывает изделие в бункер. Рабочее положение вилки регулируется в зависимости от высоты пресс-формы.

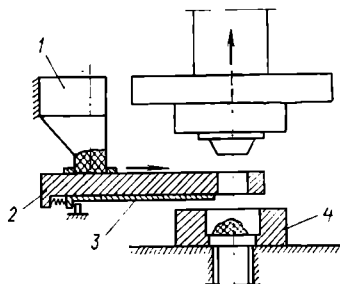


Рис. 6.11. Устройство для загрузки пресс-порошка в пресс-автомат:

1 — бункер; 2 — плита-дозатор; 3 — запорная пластина; 4 — матрица пресс-формы.

6.5.2. Двухоперационный пресс-автомат с червячной пластикацией

На этом прессе осуществляют операции предварительной пластикации и прессования. Такой пресс создается путем агрегатирования базового пресса с червячным пластикатором и стандартным механизмом для съема изделий.

Пластикационные червячные приставки (см. рис. 6.10, б) по конструкции аналогичны узлу впрыска литьевой машины. Приставку устанавливают на отдельном фундаменте за прессом и крепят к нему тягами.

Пресс-порошок из бункера поступает в материальный цилиндр, в котором расположен однозаходный червяк, совершающий вращательное и возвратно-поступательное движение. Материал пластицируется и накапливается в головной части цилиндра до заданного объема дозы, при этом червяк отходит назад.

Приставка может работать в режиме пластикатора-дозатора, который выдавливает дозу пластицированного материала в открытую пресс-форму, или в режиме литья, впрыскивая под давлением расплав в сомкнутую пресс-форму.

6.5.3. Прессы-автоматы револьверного типа

Эти прессы состоят из нескольких пресс-элементов, расположенных по окружности на вращающемся роторе. На каждом пресс-элементе установлена своя пресс-форма. Неподвижное дозирующее и сьемное устройства расположены на станине рядом с ротором.

Вращение ротора пульсирующее. За каждую пульсацию ротор поворачивается на угол $\alpha = 360/n$, где n — число позиций или пресс-элементов. Каждый из пресс-элементов проходит последовательно позиции загрузки пресс-порошка, замыкания формы, подпрессовки, выдержки под давлением (обычно занимает несколько позиций), размыкания формы, съема изделий и очистки формы.

Размыкание формы, съем изделия и очистка формы могут производиться на одной позиции. Каждый из пресс-элементов может быть оборудован своим силовым цилиндром. Прессование может также обеспечиваться одним на весь автомат силовым цилиндром, а удержание формы в замкнутом состоянии — гидравлическим запором. На револьверных прессах чаще устанавливают одногнездные, но иногда и многогнездные пресс-формы. При применении одногнездных пресс-форм снижается удельное давление прессования, создается более равномерное температурное поле в пресс-форме и облегчается ее нагрев и контроль температуры, вследствие чего улучшается внешний вид изделий и повышается точность их размеров, сокращается расход прессовочного материала, уменьшается трудоемкость изготовления пресс-форм и увеличивается срок их службы.

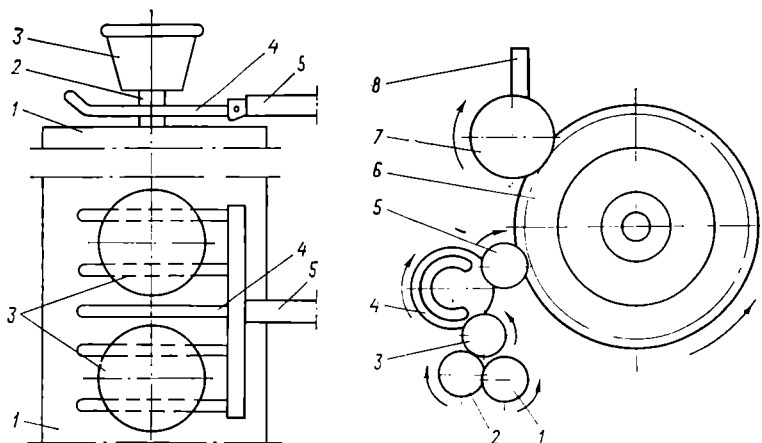


Рис. 6.12. Механизм съема изделий:

1 — матрица пресс-формы; 2 — выталкиватель; 3 — изделие; 4 — гребенка; 5 — шток.

Рис. 6.13. Схема автоматической роторной линии ЛПИ-10:

1 — ротор дозирования; 2 — ротор таблетирования; 3, 5, 7 — транспортные роторы; 4 — ротор подогрева ТВЧ; 6 — ротор прессования; 8 — транспортер.

6.5.4. Роторные линии

Роторные линии являются одним из средств комплексной механизации процесса формования [188]. Отличительной особенностью роторных линий является наличие нескольких синхронно вращающихся роторов. Каждый ротор представляет собой многопозиционную машину, предназначенную для осуществления какой-либо одной технологической или транспортной операции. Роторы вращаются непрерывно. На каждой из позиций ротора установлен комплект рабочего инструмента, который вращается вместе с ротором и обрабатываемым материалом и одновременно с вращением выполняет необходимые рабочие операции. За один оборот на каждой рабочей позиции осуществляется технологическая обработка одной детали.

Автоматическая роторная линия ЛПИ-10 предназначена для компрессионного прессования резьбовых изделий. Линия состоит из четырех рабочих и трех транспортных роторов (рис. 6.13), которые приводятся во вращение общим электродвигателем. При этом благодаря жесткой кинематической связи обеспечивается синхронная работа роторов. Пресс-порошок из бункера подается ротором дозирования 1 на ротор таблетирования 2, который по существу является шестипозиционной ротационной таблеточной машиной. Усилие таблетирования создается соответствующими гидравлическими цилиндрами. Дозирование порошка в матрице таблеточной машины объемное, с автономным регулированием на каждой позиции. Отформо-

ванные таблетки транспортным ротором 3 передаются на 24-позиционный ротор предварительного подогрева 4. Подогрев токами высокой частоты осуществляется во время прохождения таблетки между электродами, одним из которых является пластина ротора, а другим — неподвижный электрод. Нагретые до температуры 353—363 К таблетки транспортным ротором 5 передаются в очередную матрицу ротора прессования 6. Ротор прессования имеет 32 позиции, каждая из которых состоит из гидравлического цилиндра прессования, выталкивающего цилиндра и пресс-инструмента. Рабочая жидкость под давлением 5 и 20 МПа поступает от неподвижного гидродвижителя через золотник к гидравлическим цилиндрам.

На каждой позиции осуществляется смыкание, выдержка под давлением и размыкание пресс-форм, а также подпрессовка (при необходимости). За время прохождения от позиции загрузки до позиции разгрузки пресс-материал, находящийся в нагретой замкнутой пресс-форме, отверждается. После окончания процесса прессования пресс-форма размыкается, и изделие выталкивается на резьбовом знаке. При помощи шестерни, сидящей на выталкивателе и неподвижной зубчатой рейки, расположенной около ротора, резьбовой знак вывинчивается из изделия, которое удерживается пуансоном от проворачивания. Транспортным ротором 7 готовое изделие передается на лоток 8. В случае, если готовое изделие не удалено из пресс-формы, срабатывает устройство, не допускающее попадания в нее новой таблетки. Наряду с трехоперационной роторной линией ЛПИ-10, выполняющей таблетирование, нагрев материала и прессование изделий, применяются и другие роторные линии, например четырехоперационные, на которых кроме перечисленных операций производится и обработка изделий.

6.6. ТЕХНОЛОГИЯ ПРЕССОВАНИЯ

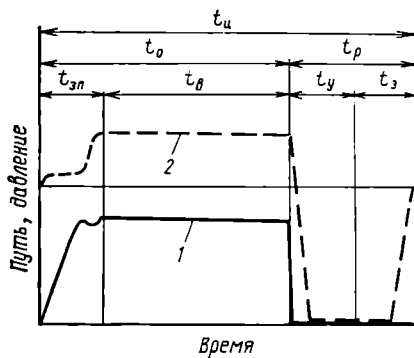
6.6.1. Дозирование и загрузка

Согласно рис. 6.14 время, затрачиваемое на операцию «дозирование», является составной частью времени загрузки. Время загрузки — время, затрачиваемое на загрузку пресс-материала в пресс-форму до начала повышения давления в оформляющей полости пресс-формы. Хотя доля времени загрузки в общем времени цикла незначительна, переработчики в интересах повышения производительности стремятся свести его к минимуму. При этом, однако, следует исключить из рассмотрения время холостого хода, так как оно зависит от конструкции прессы и не поддается влиянию переработчика. Остальное время тратится на подготовительные операции и загрузку пресс-формы.

К подготовительным операциям относятся: монтаж съемных элементов пресс-формы и их фиксация; установка металличе-

Рис. 6.14. Циклограмма прямого прессования:

1 — изменение давления в оформляющей полости пресс-формы во времени; 2 — изменение пути перемещения подвижной плиты пресса во времени ($t_{\text{ц}}$ — время цикла; t_o — время отверждения; t_p — время раскрытия формы; t_y — время удаления изделия; t_z — время заполнения формы (загрузки); t_n — время выдержки формы в замкнутом положении; $t_{\text{зп}}$ — время запираания формы).



ской арматуры и ее фиксация; обдув пресс-формы для удаления облоя и остатков пресс-материала. Подготовительные операции слабо механизированы. Однако широкие возможности для механизации и автоматизации имеются при загрузке пресс-материала в пресс-форму. Высокая степень автоматизации может быть достигнута при применении таблеток и загрузочных приспособлений. При загрузке следует учитывать, что для обеспечения благоприятных условий течения в оформляющей полости пресс-формы пресс-материал должен быть равномерно распределен в ней.

6.6.2. Запирание пресс-формы и отверждение материала

После соприкосновения пуансона с прессуемым материалом дальнейшее смыкание пресс-формы должно происходить медленнее, чтобы создать благоприятные предпосылки для уплотнения, пластикации, течения и распределения пресс-материала. В современных прессах до начала соприкосновения пуансона с пресс-материалом подвижная плита пресса опускается с большой скоростью, что позволяет сократить время цикла. Если прессование производится без предварительного подогрева, то для удаления газов и паров, выделяющихся в процессе отверждения пресс-материала, до окончательного запираания пресс-формы или через 5—10 с после смыкания осуществляют операции подпрессовки. Иногда достаточно одной подпрессовки. Наиболее благоприятные условия проведения подпрессовок подбираются экспериментальным путем. Если позволяют геометрия изделий, конфигурация пресс-формы и перерабатываемый материал, то удалять газы из пресс-формы целесообразней через специальные каналы.

После смыкания пресс-форм фиксация формы изделий происходит в результате реакций отверждения пресс-материала, протекающей при температуре прессования. Для завершения реакции отверждения необходимо определенное время и при-

ложение внешнего давления для компенсации падения давления вследствие выделения газов и паров, образовавшихся в результате реакции отверждения.

6.6.3. Раскрытие пресс-формы, удаление изделий и чистка пресс-формы

На рис. 6.14 раскрытие пресс-формы представлено временем удаления изделия и загрузки пресс-формы. Так как при удалении изделий одновременно осуществляется чистка пресс-формы, то время удаления отмечено на рисунке как время от начала раскрытия пресс-формы до завершения ее чистки. Во время раскрытия пресс-формы или сразу после раскрытия осуществляется извлечение изделия из пресс-формы механическим или ручным выталкивателем. Время, необходимое для удаления изделий, обычно незначительно, если не возникают трудности, связанные с прилипанием пресс-материала к пресс-форме или усадкой.

Прилипание пресс-материала к оформляющей поверхности пресс-формы обусловлено следующими факторами:

изменением (заменой) типа перерабатываемого материала; в этом случае пресс-форму следует чистить «нейтральным» материалом (например, при переходе от фенолоформальдегидных к полиэфирным пресс-материалам для очистки применяется меламино-формальдегидный пресс-материал); иногда достаточно хорошая смазка оформляющей полости пресс-формы воском;

содержанием в пресс-материале слишком малого или неподходящего компонента, снижающего прилипаемость; в этом случае необходимо согласовать наиболее благоприятную рецептуру перерабатываемого материала с заводом-изготовителем; применение воска или силиконового масла резко снижает прилипаемость пресс-материала;

повреждением слоя хромовых покрытий отдельных участков пресс-формы; в этом случае необходимо провести ремонтные работы с целью восстановления хромовых покрытий; как временное средство можно применять смазку поврежденных поверхностей воском или силиконовым маслом;

повышенной влажностью или недостаточной степенью реакции предварительной поликонденсации пресс-материала; в этом случае рекомендуется сушка при температуре 330—340 К или предварительный подогрев перерабатываемого материала.

Повышенная усадка изделия в пресс-форме обусловлена как недостаточно правильным учетом свойств перерабатываемого материала при конструировании пресс-формы, так и возможным колебанием свойств партии пресс-материала. Изменением технологии переработки можно оказать существенное влияние на усадку, причем следует учитывать, что при этом изменяются также и свойства готовых изделий. В общем случае необходимо учитывать, что более высокое давление снижает усад-

ку; более высокая температура переработки увеличивает усадку; более интенсивный предварительный подогрев (пресс-материалов, отверждающихся в процессе поликонденсации) снижает усадку.

После извлечения изделий из пресс-формы происходит их охлаждение до комнатной температуры. Завершающими операциями при прессовании изделий из термореактивных пресс-материалов являются механическая обработка и контроль качества. Для подготовки к проведению нового цикла прессования пресс-форма очищается от остатков отвержденного пресс-материала, особенно от грата, с помощью сжатого воздуха или неметаллическими щетками. Иногда требуется полировка оформляющей полости пресс-формы в местах прилипания.

6.6.4. Технологические параметры прессования

Для получения высококачественных изделий при одновременном соблюдении экономичности переработки необходимо обеспечить оптимальный выбор следующих параметров: удельного давления прессования; температуры пресс-формы; времени отверждения или выдержки.

Оптимальный выбор указанных параметров на предприятиях по переработке пластмасс, как правило, осуществляется на основе практических данных. Однако все чаще применяются точные методы, особенно для определения времени отверждения, выдержки и времени подогрева.

Для переработки реактопластов рекомендуются следующие значения параметров прессования:

удельное давление прессования — 15—80 МПа;

температура пресс-формы — 410—450 К;

время выдержки — 200—100 с/мм толщины стенки изделия.

Так как условия переработки сильно зависят от рецептуры перерабатываемого материала и геометрии прессуемого изделия, то приведенные данные следует рассматривать как ориентировочные.

6.6.5. Выбор параметров прессования

Удельное давление прессования. Под действием давления прессования происходит формование пресс-материала, его уплотнение, а также удаление побочных продуктов реакции отверждения. Необходимая величина давления выбирается с учетом следующих факторов.

Текучесть пресс-материала. Текучесть пресс-материала зависит от типа и содержания отверждающих связующих, типа наполнителя и его структуры, степени предварительной поликонденсации и содержания влаги. Хотя текучесть пресс-материала может быть определена с помощью соответствующей

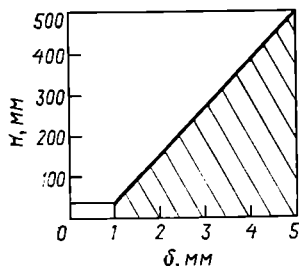


Рис. 6.15. Зависимость высоты заполнения пресс-формы H от толщины стенки изделия δ . Заштрихована «надежная» область.

щих методов испытания, часто из-за высокой стоимости такие испытания не проводятся.

С учетом данных предприятий-поставщиков пресс-материалов используется следующая качественная оценка: хорошая текучесть →

низкое давление прессования; плохая текучесть → высокое давление прессования.

Отношение высоты к толщине стенки изделия. Величина отношения высоты изделия к толщине его стенки оказывает большое влияние на выбор необходимого давления прессования. Имеется предельное значение возможной высоты заполнения при заданной толщине стенки изделий (рис. 6.15). В общем случае возможна следующая качественная оценка: большое значение отношения высоты заполнения к толщине стенки изделия → высокое давление прессования; малое значение указанного отношения → низкое давление прессования.

Предварительный подогрев. Предварительный подогрев позволяет снизить необходимое давление прессования. Благодаря применению высокочастотного предварительного подогрева удастся снизить давление прессования на 40—50%.

Температура пресс-формы. Грамотно подобранная температура пресс-формы дает возможность также значительно снизить давление прессования. Установлена связь: высокая температура → низкое давление прессования; низкая температура → высокое давление прессования.

Для реализации требуемого давления прессования, необходимо наряду с учетом конструкции пресс-формы выбрать соответствующее прессовое оборудование.

Температура пресс-формы. Температура пресс-формы, взаимосвязанная со временем отверждения, имеет большое значение для отверждения пресс-материала в оформляющей полости пресс-формы. Она выбирается в зависимости от следующих факторов.

Скорость отверждения. Практические рекомендации состоят в следующем: при переработке быстро отверждающихся пресс-материалов и большом времени смыкания формы следует выбирать низкую температуру пресс-формы и, наоборот, при переработке медленно отверждающихся пресс-материалов и небольшом времени смыкания следует работать при высокой температуре пресс-формы.

Тип и размеры изделия. При выборе толщины стенки и отношения высоты к толщине следует придерживаться следующих правил: маленькая толщина стенки → высокое давле-

Рис. 6.16. Источники тепла при переработке реактопластов.

ние прессования → высокая температура пресс-формы; большая толщина стенки → низкое давление прессования → невысокая температура пресс-формы; большое значение отношения высоты стенки к ее толщине →

→ высокое давление прессования → низкая температура пресс-формы; небольшое значение отношения высоты стенки к ее толщине → низкое давление прессования (температура пресс-формы зависит от толщины стенки изделия).

При выборе зависимой от толщины стенки температуры пресс-формы необходимо учитывать теплоту экзотермической реакции отверждения в общем балансе тепла при различных методах переработки (рис. 6.16). Тепловой эффект экзотермической реакции тем сильнее сказывается на температуре пресс-формы, чем больше толщина стенки изделия, чем быстрее протекает реакция отверждения и чем меньше степень предварительной поликонденсации пресс-материала. Перегрев толсто-стенных изделий может привести к разложению перерабатываемого материала внутри изделия. Поэтому толсто-стенные изделия следует отверждать медленно и при низких температурах пресс-формы.

На рис. 6.17 представлено изменение температуры внутренних слоев во время отверждения двух изделий из феноло-формальдегидных пресс-материалов, наполненных древесной мукой [197]. Необходимо учитывать, что крупногабаритные изделия для сохранения текучести следует прессовать при низких тем-

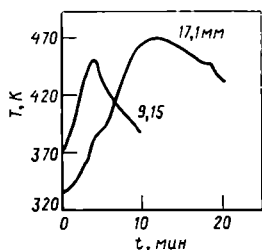
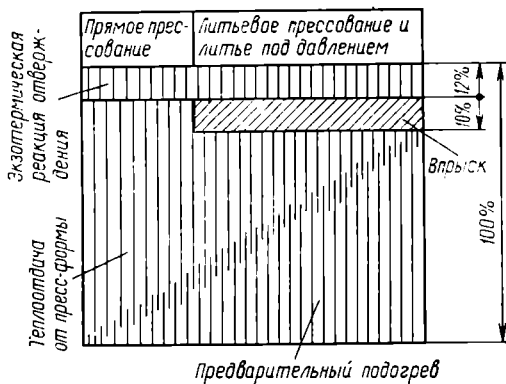


Рис. 6.17. Зависимость температуры внутри изделия от времени. Числа у кривых — толщина стенки изделия.

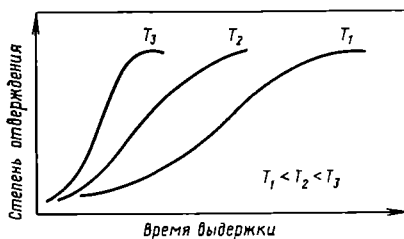


Рис. 6.18. Зависимость степени отверждения от времени выдержки в пресс-форме.

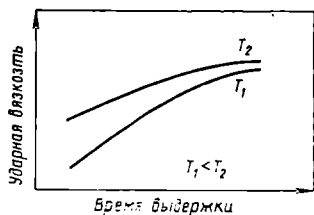


Рис. 6.19. Зависимость ударной вязкости образцов от времени выдержки в пресс-форме.

пературах пресс-формы, в то время как мелкие плоские изделия с целью повышения производительности прессуют при более высоких температурах.

Время отверждения. Выбор времени отверждения должен производиться с учетом температуры пресс-формы, так как обе эти величины связаны физико-химическими закономерностями. Чем выше температура пресс-формы, тем меньше время отверждения. В качестве исходной позиции можно использовать эмпирическую формулу кинетики реакции, согласно которой повышение температуры на 10 К вызывает увеличение скорости реакции отверждения в два раза. Однако при этом следует учитывать также теплоту реакции поликонденсации при отверждении. Кроме того, согласно рис. 6.14, время отверждения включает в себя времена смыкания и выдержки. В связи с этим различают время разогрева и время отверждения. Такое разделение необходимо, потому что часть времени отверждения расходуется на разогрев пресс-материала, и поэтому не все время отверждения расходуется непосредственно на протекание реакции отверждения. Часто за время отверждения принимают время выдержки, причем за время выдержки принимают время с момента достижения конечного (установленного) давления до начала раскрытия пресс-формы. Так как время смыкания по сравнению со временем выдержки очень мало, то такое предположение справедливо.

На рис. 6.18 показано влияние температуры пресс-формы на степень отверждения при прессовании. На время отверждения (выдержки) оказывают влияние тип пресс-материала, геометрия изделия и предварительный подогрев.

Таким образом, время отверждения, или время выдержки, оказывает влияние на процесс отверждения, причем моменту завершения отверждения должно соответствовать такое состояние пресс-материала, при котором изделие приобретает необходимые физико-механические и эксплуатационные свойства. Свойства изделий сильно зависят от степени отверждения пресс-материала. Конечная степень отверждения определяет технологию прессования, особенно время отверждения, или выдержки.

Так как до сих пор отсутствуют приемлемые методы исследования степени отверждения, то переработчики принимают за критерии степени отверждения такие, которые наиболее просто и достоверно позволяют судить о степени отверждения. Одним из способов оценки степени отверждения является исследование механических или электрических свойств изделий как функции степени отверждения, или выдержки. На рис. 6.19 показана

зависимость ударной вязкости отпрессованных образцов от времени выдержки.

Для фено- и аминопластов широко применяется так называемый метод кипячения [194]. Другие методы исследования степени отверждения основаны на экстракции растворимой части смолы или на измерении количества тепла, выделяющегося при отверждении. Точным и относительно простым методом определения параметров переработки термореактивных пресс-материалов является метод, основанный на применении пластометра Канавца.

На рис. 6.20 приведены принципиальные схемы литьевого прессования. Как видно из рисунков 6.20 и 6.21, операции циклов прямого и литьевого прессования аналогичны. Однако при литьевом прессовании отпадает необходимость удаления газов (подпрессовки), хотя, естественно, должна быть создана возможность удаления воздуха и промежуточных продуктов реакций отверждения.

Процессы, протекающие при литьевом прессовании, представлены на рис. 6.21 в виде кривых «путь — время» и «давление — время».

После загрузки пресс-материала в литьевой цилиндр опусканием подвижной плиты пресса пресс-форма закрывается. После закрытия пресс-формы и создания необходимого усилия запирания литьевой плунжер начинает впрыскивать пресс-материал в оформляющую полость, причем начало роста давления в литьевом цилиндре принимают за начало времени впрыска. Через литниковые каналы перерабатываемый материал попадает в оформляющую полость литьевой пресс-формы. Для преодоления сопротивления в каналах пресс-формы необходимо прикладывать определенное усилие. Во время выдержки в литьевой пресс-форме происходит отверждение пресс-материала (за счет реакции поликонденсации) и фиксация формы изделия. По окончании установленного технологическим режимом времени выдержки давление в оформляющей полости литьевой пресс-формы и в литьевом цилиндре падает. При удалении изделия литьевой плунжер выполняет роль толкателя, как показано на диаграмме «путь — время».

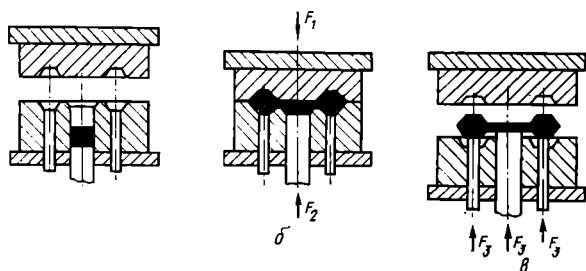


Рис. 6.20. Принципиальные схемы литьевого прессования:

a — дозирование; *б* — впрыск; *в* — удаление изделия. F_1 , F_2 , F_3 — усилия запирания, впрыска, выталкивания соответственно.

При литьевом прессовании для достижения оптимальных свойств изделий с одновременным соблюдением экономичности работы необходимо согласовать друг с другом следующие параметры: давление в литьевом цилиндре и в оформляющей полости пресс-формы; температуру предварительного подогрева и температуру пресс-формы; время отверждения (куда входят времена впрыска и выдержки под давлением). В зависимости от типа пресс-материала выбираются различные значения указанных параметров. В большинстве случаев литьевым прессованием перерабатываются таблетированные и предварительно подогретые током высокой частоты пресс-материалы.

Из-за сопротивлений литниковой системы и оформляющей полости пресс-формы давления в последней значительно ниже давления литья. Потери давления на преодоление указанных сопротивлений составляют до 75% давления литья. Однако потери давления создают очень хорошие условия для удаления летучих, выделяющихся в процессе отверждения, а наличие сопротивлений литниковой системы способствует хорошему перемешиванию пресс-материала. Кроме того, значительные диссипативные тепловыделения приводят к снижению вязкости поступающего в оформляющую полость пресс-материала. Это позволяет получать литьевым прессованием изделия сложной конфигурации и с металлической арматурой. Благодаря равномерному и интенсивному разогреву пресс-материала при прохождении через литниковую систему значительно сокращается время отверждения, и оно не зависит от толщины стенки изделия.

Следовательно, способом литьевого прессования можно формировать изделия разной толщины, не опасаясь местного перегрева или недоотверждения, что в особенности важно при переработке аминопластов.

В работе [197] приведены диаграммы для определения минимальных значений давления литья. Наряду с температурой литья большую роль играют температура предварительного подогрева, длина литникового канала и сечение впускного литника. На рис. 6.22 показана зависимость минимального давления впрыска от температуры предварительного подогрева для фенопласта при впрыске пресс-материала снизу вверх.

Во избежание разгерметизации оформляющей полости давление литья после завершения процесса впрыска должно поддерживаться столько времени, сколько необходимо для завершения процесса отверждения пресс-материала во впускных литниках. Для обеспечения нормального хода реакции отверждения большое значение имеют конструкция и размеры литникового канала. От литниковой системы требуется, чтобы пресс-материал при поступлении в оформляющую полость был нагрет до температуры переработки (пресс-формы) и чтобы она обеспечивала пропускную способность $0,6—1 \text{ г/(мм}^2 \cdot \text{с)}$.

Время отверждения складывается из времени впрыска и

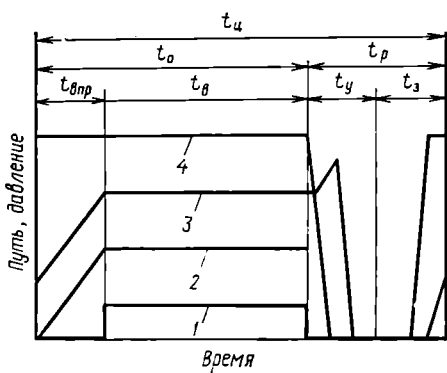


Рис. 6.21. Циклограмма литьевого прессования:

1 — изменение давления в оформляющей полости пресс-формы; 2 — изменение давления в литьевом цилиндре; 3 — изменение пути перемещения литьевого плунжера; 4 — изменение пути перемещения пуансона; $t_{впр}$ — время впрыска; $t_{ц}$ — время цикла; $t_{о}$ — время отверждения; $t_{в}$ — время выдержки; $t_{р}$ — время раскрытия полуформ; $t_{у}$ — время удаления; $t_{з}$ — время загрузки.

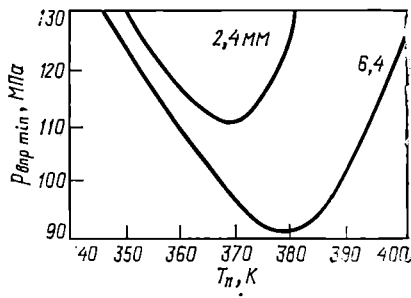


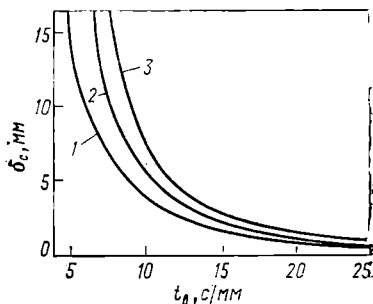
Рис. 6.22. Зависимость минимального давления впрыска $P_{впр min}$ от температуры предварительного подогрева $T_{п}$ для фенопласта при длине литникового канала 35 мм. Числа у кривых — площадь поперечного сечения впускного литника.

времени выдержки (см. рис. 6.21). Время впрыска в соответствии с технологическими и конструктивными требованиями устанавливается в пределах 15—30 с. Для конкретных условий переработки при заданной технологии (например, при использовании предварительного подогрева и для данной конструкции пресс-формы) время впрыска, как правило, является постоянной величиной. Следует, однако, учесть, что при слишком быстром впрыске возникает опасность перегрева пресс-материала (из-за большого диссипативного тепловыделения), результатом чего является появление пятен (следов разложения) на внешней поверхности готовых изделий. При слишком медленном впрыске из-за преждевременного отверждения пресс-материала возможно недоформование изделий.

При оптимальном предварительном подогреве время выдержки (время с момента окончания заполнения оформляющей полости до

Рис. 6.23. Зависимость времени выдержки $t_{в}$ от толщины стенок δ_c при переработке предварительно подогретых пресс-материалов:

1 — быстроотверждающийся пресс-материал; 2 — аминопласты; 3 — фенопласты.



начала раскрытия пресс-формы) составляет 15 с на 1 мм толщины стенки изделий при толщине стенки до 8 мм.

На рис. 6.23 представлена зависимость времени выдержки от толщины стенки в случае применения предварительного подогрева. При переработке без применения предварительного подогрева данные значения, приведенные на рис. 6.23, следует удвоить.

6.6.6. Сравнение методов прямого прессования, литьевого прессования и литья под давлением

При сравнении методов прямого прессования, литьевого прессования и литья под давлением необходимо исходить из прогрессивности каждого из методов; эффектов, достигаемых при переработке пластических масс этими методами; применяемой техники и необходимых для этого средств; экономии времени и рабочей силы. В каждом конкретном случае предложения при выборе методов переработки должны быть также издержки производства; требования, предъявляемые к свойствам изделий; конструктивные особенности изделия и серийность. При выборе метода переработки большое ограничение накладывает, естественно, и имеющееся оборудование.

При сравнении прогрессивности рассматриваемых методов следует учесть, что при литье под давлением все стадии процесса осуществляются на одной машине, в то время как при прямом прессовании и литьевом прессовании дозирование, таблетирование и предварительный подогрев производятся в особых устройствах, расположенных вне прессового оборудования. Это приводит к росту себестоимости изделия и создает дополнительные трудности в автоматизации процесса переработки.

Сравнение эффектов, достигаемых перечисленными выше методами переработки, позволяет выделить следующие преимущества и недостатки рассматриваемых методов.

1. При прямом прессовании, литьевом прессовании и литье под давлением предварительный подогрев пресс-материала осуществляется вне формующего инструмента. Следствием этого является экономически выгодное сокращение времени отверждения, а также обусловленная однородностью температуры перерабатываемого материала однородность отверждения изделий, которая приводит к улучшению их свойств. Если при прямом прессовании время отверждения или выдержки зависит от толщины стенки, то при литьевом прессовании и литье под давлением благодаря лучшему предварительному подогреву эта зависимость выражена значительно слабее. Поэтому двумя последними методами возможно формирование весьма разнотолщинных изделий.

2. Значительно лучшие возможности удаления летучих в процессах пластикации и заполнения формы при литьевом прессовании и литье под давлением приводит к улучшению свойств готовых изделий.

3. Благодаря тому, что перерабатываемый материал при литьевом прессовании и литье под давлением поступает в форму уже в пластицированном состоянии, эти методы по сравнению с прямым прессованием обладают рядом преимуществ:

а) пресс-форма менее нагружена, благодаря чему она меньше изнашивается, и удлиняется срок ее службы. Исключение составляет литниковая система, которая при литье под давлением и литьевом прессовании подвергается большому износу;

б) при литьевом прессовании и литье под давлением можно изготавливать изделия с арматурой; благодаря заполнению пресс-форм и литьевых форм предварительно пластицированным материалом арматура меньше деформируется;

в) литьевое прессование и литье под давлением дают возможности лучшего оформления контуров изделий, благодаря чему возможно формование изделий сложной конфигурации.

4. Так как при литьевом прессовании и литье под давлением перерабатываемый материал впрыскивается в замкнутую форму, то достигается большая точность размеров. Благодаря впрыску в закрытую форму образуется более тонкий грат, который легче удалить, чем при прямом прессовании.

5. Потери материала наименьшие при прямом прессовании, так как при литьевом прессовании и литье под давлением имеют место потери материала в литниковой системе и в литьевом цилиндре (при литьевом прессовании).

6. Преимуществом прямого прессования перед двумя другими методами является отсутствие ориентации частиц наполнителя, которая значительно при литьевом прессовании и литье под давлением. Ориентация частиц наполнителя приводит к анизотропии механических свойств изделия, усадке, короблению, образованию трещин.

7. Стоимость пресс-форм для прямого прессования значительно ниже, чем стоимость форм для литьевого прессования и литья под давлением.

6.7. ПРЕСС-ФОРМЫ

6.7.1. Съёмные пресс-формы

Съёмные пресс-формы отличаются следующими особенностями: отсутствием крепления к плитам пресса; отсутствием собственных нагревателей, вследствие чего необходимо предусмотреть специальные нагревательные плиты, стационарно установленные на прессе; осуществлением удаления отпрессованных изделий, чистки оформляющей полости и загрузки формы пресс-материалом вне пресса; простой конструкции и небольшой массой, что облегчает ручной съём формы. Съёмные пресс-формы применяются при мелкосерийном производстве, для изготовления опытных образцов изделий или при экспериментальных работах. При применении съёмных форм нельзя предъявлять к

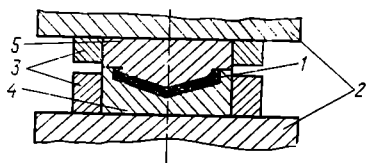


Рис. 6.24. Пресс-форма открытого типа:
1 — изделие; 2 — нагревательные плиты; 3 —
обоймы; 4 — матрица; 5 — пуансон.

изделиям требования высокой точности и качества поверхности. В них трудно получать изделия сложной конфигурации. На рис. 6.24 представлена конструктивная схема пресс-формы открытого типа.

6.7.2. Полустационарные и стационарные пресс-формы

Отличительными признаками этих пресс-форм являются: закрепление на плитах пресса; существование собственных нагревателей; наличие у полустационарных форм сменных элементов оформляющей полости, штифтов, винтов и т. д., так как загрузка пресс-материала и съем изделий часто осуществляются вне пресса; наличие системы выталкивания у стационарных пресс-форм, так как загрузка пресс-материала и удаление изделий в этом случае осуществляется непосредственно на прессе.

Полустационарные пресс-формы применяются для прессования изделий с резьбовыми отверстиями, с металлической арматурой, а также в мелко- и среднесерийном производствах; стационарные пресс-формы главным образом применяются в крупносерийном и массовом производствах.

В работе [189] даны рекомендации по конструированию полустационарных и стационарных пресс-форм, которые позволяют сократить издержки производства и повысить производительность труда. В работе [190] приведены стандарты на отдельные элементы указанных типов пресс-форм.

Типичные примеры рассмотренных пресс-форм приведены на рис. 6.25 и 6.26.

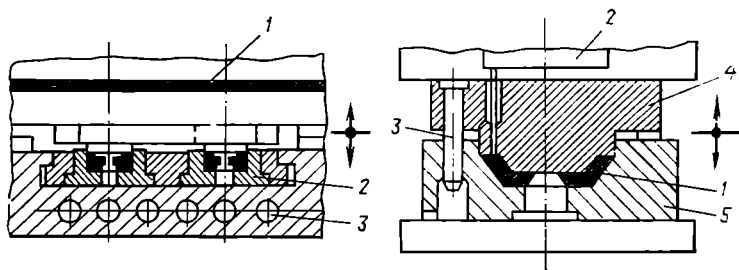


Рис. 6.25. Полустационарная пресс-форма со съемной кассетой:

1 — тепловыизоляционная прокладка; 2 — съемная кассета; 3 — каналы для нагревательных элементов.

Рис. 6.26. Стационарная пресс-форма:

1 — изделие; 2 — выталкиватели; 3 — направляющая колонна; 4 — пуансон; 5 — матрица.

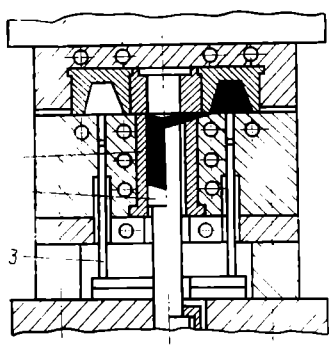


Рис. 6.27. Литьевая пресс-форма с горизонтальной плоскостью разъема:
1 — литевой цилиндр; 2 — литевой плунжер; 3 — выталкиватели.

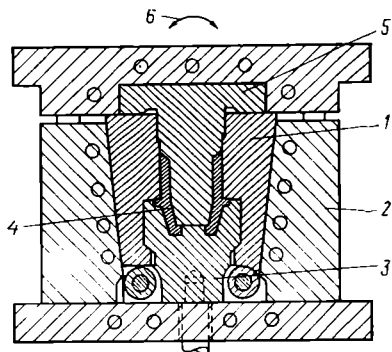


Рис. 6.28. Пресс-форма «книжного» типа:
1 — раскрывающаяся стенка матрицы; 2 — обойма матрицы; 3 — дно матрицы; 4 — изделие; 5 — пуансон; 6 — направление раскрытия.

Большинство пресс-форм для прямого и литьевого прессования имеют горизонтальные плоскости разъема (рис. 6.27 и 6.28). Для изготовления изделий с боковыми сквозными отверстиями, с резьбовыми металлическими втулками и штифтами требуются пресс-формы с вертикальной плоскостью разъема (рис. 6.28). Пресс-формы с горизонтальной и вертикальной плоскостями разъема, которые устанавливаются на угловых прессах, позволяют формовать очень сложные изделия (рис. 6.29).

6.7.3. Пресс-формы открытого типа

Оформляющая полость в пресс-формах открытого типа одновременно служит загрузочной камерой. Благодаря этому излишек загруженного пресс-материала до полного смыкания пресс-формы беспрепятственно может вытекать через отжимные кромки (ранты). Такая конструктивная особенность пресс-формы неблагоприятно сказывается на качестве изделия, так как не все давление прессования передается на материал, вследствие чего он плохо уплотняется. Результатом этого является порис-

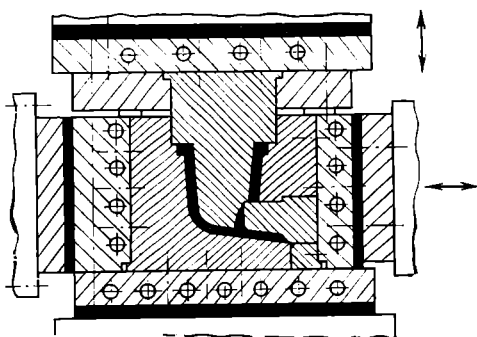


Рис. 6.29. Пресс-форма с вертикальной и горизонтальной плоскостями разъема.

тость прессованных изделий и недостаточная их прочность, если не передозировать материал. Поэтому пресс-материалы, наполненные бумажной крошкой, волокнистым наполнителем и имеющие небольшую насыпную массу нельзя перерабатывать в таких пресс-формах. Отличительной особенностью изделий, изготовленных в пресс-формах открытого типа, является наличие увеличенного грата, из-за которого размер детали в направлении прессования отклоняется от заданного.

6.7.4. Пресс-формы закрытого и полузакрытого типов

Эти пресс-формы отличаются тем, что размеры оформляющей полости выбраны таким образом, что в них можно перерабатывать пресс-материалы с плохой текучестью или с волокнистыми наполнителями. Кроме того, пуансон в процессе смыкания заходит в оформляющую полость пресс-формы, плотно замыкает ее, благодаря чему предотвращается вытекание пресс-материала из оформляющей полости. Плотное запирающее оформляющей полости требует более точного дозирования пресс-материала, чем в пресс-формах открытого типа, так как излишек пресс-материала, а также газы и пары воды, образующиеся в процессе прессования, не могут быть удалены через точно притертые пазы или же через зазоры, образованные вследствие износа металлических поверхностей пуансона и матрицы.

Основные различия между пресс-формами закрытого и полузакрытого типов заключаются в выборе конструкции пуансона и связанным с этим видом грата на изделии [191].

В пресс-формах закрытого типа размер поперечного сечения пуансона лишь немногим больше, чем площадь проекции изделия на плоскость разъема. Благодаря этому облегчено удаление изделий из оформляющей полости пресс-формы. На изделии при этом образуется вертикальный грат. Пуансон в пресс-формах закрытого типа имеет большую площадь поперечного сечения, чем площадь поверхности изделия. Вследствие этого на изделии при прессовании образуется горизонтальный грат.

6.7.5. Одногнездные и многогнездные пресс-формы

Под гнездностью пресс-формы понимают количество изделий, одновременно прессуемых в одной пресс-форме за один цикл прессования.

По числу гнезд различают одногнездные, двухгнездные и т. д. пресс-формы. Верхний предел гнездности пресс-форм не установлен; в литературе упоминается 120-гнездная пресс-форма с винтовым запорным устройством. На гнездность пресс-формы оказывает влияние множество факторов: требуемая производительность с одной пресс-формы за определенный промежуток времени (месяц, квартал, год); степень сложности

прессуемых изделий (размер и геометрия изделия, точность размеров изделия и др.); тип пресс-материала (порошкообразный, гранулированный, волокнистый); характеристика наличного оборудования (усилие прессования, размер плит пресса, ход плит пресса, система выталкивания и др.); экономичность производства (стоимость пресс-формы, амортизационный срок, серийность производства и др.).

Из-за трудности учета всего множества факторов, влияющих на гнездность формы, при ее выборе необходимо в определенных случаях ограничиться лишь некоторыми (например, размерами изделий, имеющимся прессом или числом и размерами изделий).

В многогнездных пресс-формах применяются два типа загрузочных камер: индивидуальная и общая. Многогнездные пресс-формы с индивидуальными загрузочными камерами можно представить как совокупность простых пресс-форм с индивидуальными загрузочными камерами, смонтированных в массивном стальном блоке — матрице (рис. 6.30) или в стальной обойме (рис. 6.31). Последний конструктивный вариант имеет значительное преимущество, состоящее в том, что при повреждении поверхности оформляющей полости поврежденные элементы можно легко заменить новыми.

Загрузка порошкообразных пресс-материалов осуществляется с помощью различных объемных дозирующих устройств (загрузочных рам, загрузочных шаблонов и приспособлений), которые устанавливаются над открытыми пустыми, очищенными от грязи оформляющими полостями пресс-формы. Такой способ дозирования пресс-материала не совсем точен и приводит иногда к пористости изделий. Лучшим способом дозирования является применение таблеток, особенно тогда, когда применяются пресс-материалы с грубо структурированными наполнителями (волокна, хлопья, крошки).

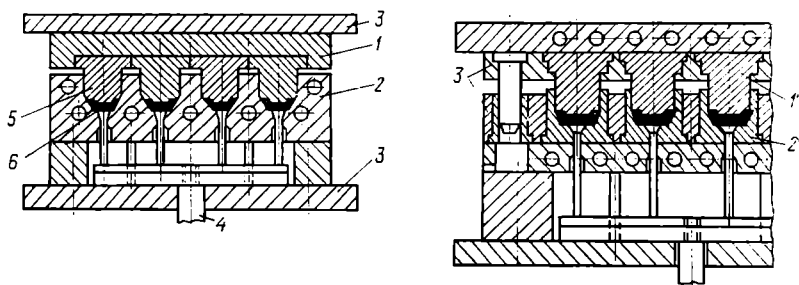


Рис. 6.30. Многогнездная пресс-форма с раздельными загрузочными камерами:

1 — обойма пуансонов; 2 — стальной блок-матрица; 3 — плиты; 4 — выталкиватель; 5 — пуансон; 6 — изделие.

Рис. 6.31. Многогнездная пресс-форма с раздельными загрузочными камерами и сменным пуансоном и матрицей:

1 — сменный пуансон; 2 — сменная матрица; 3 — обоймы.

Многогнездные пресс-формы с общей загрузочной камерой преимущественно применяются для изготовления мелких изделий, так как применение индивидуальных загрузочных камер в этом случае не имеет смысла и невозможно с точки зрения обеспечения необходимой прочности пресс-формы. Рис. 6.32 и 6.33 иллюстрируют возможность проектирования и расположения оформляющей полости в многогнездных пресс-формах с общей загрузочной камерой.

При использовании многогнездных пресс-форм с общей загрузочной камерой необходимо учитывать, что из-за образования грата, соединяющего друг с другом все прессуемые детали, нельзя применять пресс-материалы с волокнистыми наполнителями. Указанные пресс-материалы в силу своей структуры и низкой текучести требуют более высокого давления прессования для получения тонкого горизонтального грата (облоя), чем порошкообразные пресс-материалы, и вызывают больший износ пресс-форм. Образование горизонтального грата в некоторых случаях зависит от размеров и геометрии прессуемых изделий, расположения загрузочной камеры относительно оформляющей полости формы и глубины погружения пуансона в матрицу (см. рис. 6.33).

При определении необходимого усилия прессования или удельного давления прессования необходимо учитывать не только площадь проекции изделий на плоскость разъема пресс-форм, но и площадь поверхности горизонтального грата, так как последняя также воспринимает усилие прессования. Обеспечение минимальной толщины грата требует приложения определенного усилия прессования.

Во многих случаях при прессовании изделий применяют групповые пресс-формы. Групповые пресс-формы представляют собой особый тип многогнездных пресс-форм. В них изготавливаются изделия различных конфигураций и видов (рис. 6.34). Благодаря этому обеспечиваются одинаковые условия прессования, что имеет большое значение при переработке термо- и светочувствительных пресс-материалов. Все изделия, изготовленные за один цикл прессования, имеют одинаковую цветовую

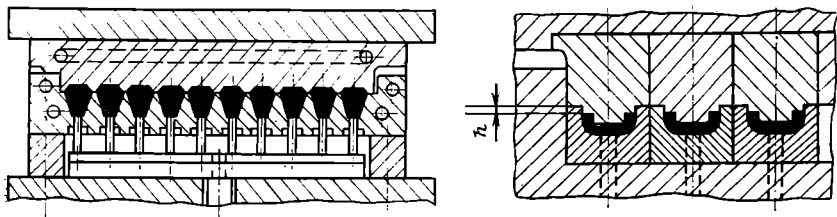
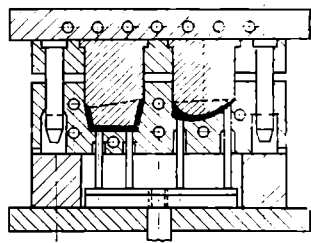


Рис. 6.32. Многогнездная пресс-форма с общей загрузочной камерой.

Рис. 6.33. Многогнездная пресс-форма со сменными пуансонами и матрицами (h — глубина погружения пуансона, равная 1—2 мм).

Рис. 6.34. Многогнездная групповая стационарная пресс-форма.



тональность, так как получены при одинаковых параметрах прессования. Это преимущество имеет большое значение, если изготовленные за один цикл прессования различные детали предназначены для сборки единого изделия. При изготовлении различных изделий в групповых пресс-формах необходимо обеспечивать равномерность стенок прессуемых изделий. Так как время прессования определяется толщиной стенок изделий, то в случае разнотолщинности стенок тонкостенные участки изделий перегреваются, в результате чего искажается цветовая монотонность.

6.7.6. Конструирование и изготовление пресс-форм для прямого и литьевого прессования

Конструирование пресс-форм предполагает знание основных параметров, необходимых для достижения требуемого качества прессуемого изделия, обеспечения безаварийного производства и гарантирования надежности работы пресс-форм под действием сил, возникающих в процессе прессования. К важнейшим параметрам относятся: необходимое усилие прямого и литьевого прессования; объем загрузочной камеры; величина хода при полном раскрытии пресс-форм; размеры литниковой системы в пресс-формах для литьевого прессования. Существуют и другие факторы, влияющие на конструкции пресс-форм.

Определение усилия прямого прессования. Решающее значение при определении размеров элементов пресс-формы и выборе пресса имеет знание требуемого давления прессования, площади поверхности изделия и суммарного усилия прессования. Под давлением прессования понимают усилие прессования пресс-материала, приходящееся на единицу площади проекции изделия [191]. Давление прессования зависит от множества факторов. Некоторые из них были перечислены выше. По экспериментальным данным, давление прессования в зависимости от типа связующих (феноло-формальдегидные, мочевино-формальдегидные и меламино-формальдегидные смолы) и типа наполнителя (минеральная мука, древесная мука, бумажные и целлюлозные крошки, текстильные волокна и крошки) колеблется от 20 до 80 МПа. Необходимое усилие прессования F_n определяется по формуле

$$F_n = p_{уд} s_{\Sigma} \quad (6.10)$$

где $p_{уд}$ — удельное давление прессования; s_{Σ} — общая площадь проекций изделий на плоскость, перпендикулярную направлению прессования (в пресс-формах закрытого типа необходимо учесть «мертвую» зона прессования).

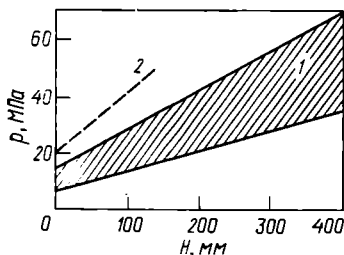


Рис. 6.35. Зависимость давления прессования p фенопластов от глубины оформляющей полости формы H для предварительно подогретого пресс-материала (1) и без предварительного подогрева (2).

Однако определенное таким образом усилие прессования не учитывает потери давления на трение пресс-материала о поверхности оформляющей полости пресс-формы, которые составляют до 9% на каждый сантиметр глубины оформляющей полости. Кроме того, в этих расчетах должна учитываться площадь боковой поверхности пресс-формы. Полное усилие прессования определяется по следующей формуле:

$$F_{\pi} = \frac{\pi D^2}{4} p_0 + \pi D L f p_0 = \frac{\pi D^2}{4} p_0 \left(1 + \frac{4 L f}{D} \right) \quad (6.11)$$

где D — диаметр пуансона; L — глубина оформляющей полости пресс-формы; p_0 — начальное давление прессования; f — коэффициент трения пресс-материала о сталь ($f=0,2 \div 0,3$).

На рис. 6.35 представлена зависимость давления прессования от глубины оформляющей полости пресс-формы.

Формула (6.11) получена для цилиндрических пуансонов. При других формах пуансона при известной площади поверхности изделия s_{Σ} применяется понятие приведенного диаметра $D_{\text{прив}}$, который определяется по формуле

$$D_{\text{прив}} = \sqrt{4 s_{\Sigma} / \pi} \quad (6.12)$$

Начальное давление прессования принимают в большинстве случаев равным 10—20 МПа, что хорошо согласуется с практическими данными.

Определение усилия литьевого прессования. При выборе конструкции пресс-формы имеет большое значение направление впрыска (рис. 6.36): осуществляется ли впрыск сверху (рис. 6.36, а) или снизу (рис. 6.36, б).

Необходимое давление впрыска нельзя определить точно, так как на него влияет множество факторов, такие как тип перерабатываемого материала, температура предварительного подогрева, длина литникового канала и др. Минимальное давление литьевого прессования можно определить из диаграммы, представленной на рис. 6.35. Усилие литьевого прессования при известных размерах литьевого пуансона и литниковой системы может быть определено по следующей формуле:

$$\begin{aligned} F_{\text{лп}} &= \frac{\pi D^2}{4} p_{2,3} \lg \left(\frac{D}{d} \right)^2 + \pi D L f p = \\ &= \frac{\pi D^2}{4} p \left[2,3 \lg \left(\frac{D}{d} \right)^2 + \frac{4 L}{D} f \right] \end{aligned} \quad (6.13)$$

Таблица 6.1. Усилия литейного прессования и усилия запирания форм

Усилия литейного прессования $F_{лп}$, кН	Усилия запирания форм F_3 (кН) при различных значениях $F_{лп}/F_3$						
	1 : 1,25	1 : 1,3	1 : 1,35	1 : 1,4	1 : 1,45	1 : 1,5	1 : 2
100	125	130	135	140	145	150	200
200	250	260	270	280	290	300	400
300	375	390	405	420	435	450	600
400	500	520	540	560	580	600	800
500	625	650	675	700	725	750	1000
600	750	780	810	840	870	900	1200
700	875	910	945	980	1015	1050	1400
800	1000	1040	1080	1120	1160	1200	1600
900	1125	1170	1215	1260	1305	1350	1800
1000	1250	1300	1350	1400	1450	1500	2000
1250	1562,5	1625	1687,5	1750	1812,5	1875	2500
1500	1875	1950	2025	2100	2175	2250	3000
1750	2187,5	2275	2362,5	2450	2537,5	2625	3500
2000	2500	2600	2700	2800	2900	3000	4000
2500	3125	3250	3375	3500	3625	3750	5000
3000	3750	3900	4050	4200	4350	4500	6000
5000	6250	6500	6750	7000	7250	7500	10000

где $F_{лп}$ — усилие литейного прессования; D — диаметр литейного пуансона; d — диаметр литникового канала; p — давление литья; L — ход литейного плунжера; f — коэффициент трения.

Усилие запирания формы должно быть по крайней мере на 10% больше усилия литейного прессования. Значения усилий запирания форм и усилий литейного прессования приведены в табл. 6.1. При конструировании литейных пресс-форм (при определении размеров элементов пресс-формы) следует наряду с усилием литейного прессования учитывать значительно более высокие значения усилий запирания полуформ (при этом необходимо принимать во внимание особенности передачи усилий запирания при впрыске сверху).

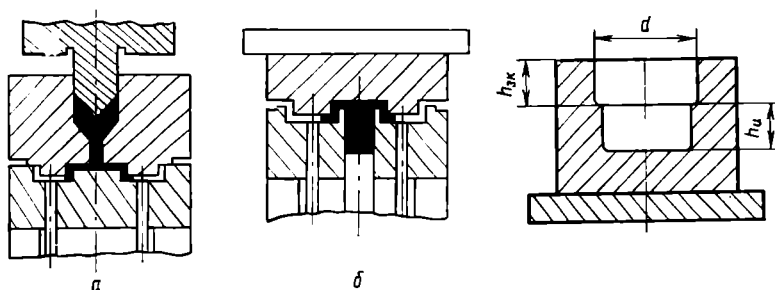


Рис. 6.36. Принципиальные схемы литейного прессования с впрыском сверху (а) и снизу (б).

Рис. 6.37. К выбору конфигурации оформляющей полости пресс-формы (d — диаметр загрузочной камеры; $h_{зк}$ — глубина загрузочной камеры; h_n — высота изделия).

Определение размеров загрузочной камеры. Пресс-формы закрытого и полузакрытого типов для приема соответствующего количества пресс-материала нуждаются в так называемой загрузочной камере (рис. 6.37), размеры которой зависят от нескольких факторов: объема готового изделия; насыпной массы пресс-материала; высоты изделия; количества отходов на образование грата (облоя).

Исходной величиной при определении размеров загрузочной камеры является объем пресс-материала, необходимый для изготовления изделия. Объем пресс-материала определяется из соотношения

$$V_M = (V_{\text{и}} + V_{\text{п}}) k_3 \quad (6.14)$$

где $V_{\text{и}}$ — объем изделия; $V_{\text{п}}$ — объем дополнительного материала, необходимого для компенсации потерь; k_3 — коэффициент заполнения, характеризующий особенности пресс-материала (степень сжатия, плотность).

Количество пресс-материала для компенсации потерь составляет 3—10% от массы изделия.

Ниже приведены значения коэффициента k_3 для пресс-материалов с наиболее распространенными типами наполнителей (значение k_3 для отпрессованного и отвержденного пресс-материала принято за единицу):

Наполнитель	Исходный пресс-материал	Предварительно уплотненный пресс- материал (таблетки, гранулы и др.)
Минеральная мука	1	—
Асбестовое волокно	3	1,5
Асбестовый шнур	4,3	4
Древесная мука	2,5	1,4
Целлюлоза	5,5	2
Текстильные волокна	5,5	2
Текстильные крошки	10	3,5

Как видно из рис. 6.37, объем загрузочной камеры зависит от высоты изделия и площади проекции изделия на плоскость разреза. Так как оформляющая полость также выполняет функцию загрузочной камеры (при прессовании глубоких изделий загрузочная камера выполняется небольших размеров или полностью отсутствует), то и ее объем необходимо учитывать при определении высоты загрузочной камеры.

Высота загрузочной камеры пресс-формы определяется из соотношений

$$V_M - V_{\text{п}} = s_{\text{зк}} h_{\text{зк}} \quad (6.15)$$

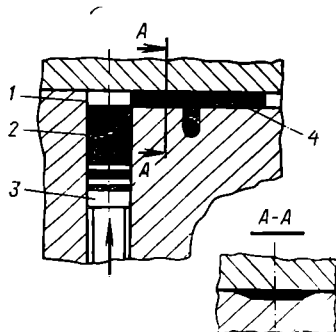
$$h_{\text{зк}} = \frac{V_M - V_{\text{и}}}{s_{\text{зк}}} \quad (6.16)$$

где V_M и $V_{\text{и}}$ — см. формулу (6.14); $h_{\text{зк}}$ — глубина (высота) загрузочной камеры; $s_{\text{зк}}$ — площадь «живого» сечения загрузочной камеры.

Ошибочно выбранные размеры загрузочной камеры могут привести к следующим нежелательным последствиям. Если

Рис. 6.38. Принципиальная схема литев-
го цилиндра, литникового канала и впуск-
ного литника:

1 — литниковый канал; 2 — впускной литник; 3 —
литевой плунжер; 4 — изделие.



глубина загрузочной камеры недо-
статочна, то пресс-материал будет
не полностью загружен и потребу-
ется неоднократный подъем и опу-
скаание плиты пресса, что приведет
к увеличению времени цикла или
пресс-материал будет отжиматься

при опускании плиты в сторону и его будет недостаточно для
полного оформления изделия на всю глубину. Если же глубина
загрузочной камеры слишком велика, то увеличивается общая
высота пресс-формы, вследствие чего повышается ее стоимость;
в экстремальных случаях приходится использовать прессы боль-
ших размеров; возрастает величина хода подвижной плиты
пресса, в результате чего увеличивается время цикла, удлиняет-
ся путь извлечения изделия и соответственно удлиняются вы-
талкивающие шпильки, что приводит к снижению надежности
их работы.

**Выбор необходимой величины хода пуансона (подвижной
плиты пресса).** Для извлечения отпрессованных изделий из
оформляющей полости пресс-формы требуется определенное
расстояние между пуансоном и матрицей. Путь, проходимый
пуансоном при прессовании, называется ходом пуансона.

Требуемая величина хода пуансона должна в несколько раз
превышать высоту прессуемых изделий, чтобы быстро и без
особых трудностей можно было проводить операции удаления
отформованных деталей, чистку оформляющей полости пресс-
формы и загрузку пресс-материала. Величина хода пуансона
зависит от следующих факторов: высоты изделий $h_{из}$, конст-
рукции пресс-формы; способа удаления прессованных изделий
(ручной или механизированный); конструкции выталкивате-
лей; способа дозирования.

С учетом того, что время, затрачиваемое на прямой и об-
ратный ход пуансона, входит в общее время цикла, величина
хода пуансона должна быть выбрана не слишком большой.
На практике она выбирается из следующего соотношения:

$$h_{x_{min}} \geq 3h_{из} \quad (6.17)$$

где $h_{x_{min}}$ — минимальный ход пуансона.

**Определение размеров литниковой системы и литевого ци-
линдра при литевом прессовании.** При конструировании пресс-
форм для литевого прессования большое значение имеет пра-
вильное расположение оформляющих гнезд, определение раз-
меров литниковой системы и литевого цилиндра.

Литниковая система включает в себя литниковые каналы и впускные литники (рис. 6.38). Впускные литники соединяют литниковые каналы непосредственно с оформляющими полостями (изделием). Литниковые каналы связаны с литьевым цилиндром. В большинстве случаев впускные литники располагаются в плоскости разъема пресс-форм, если не применяются специальные впускные литники (литники туннельного типа, кольцеобразные литники).

Прямые или слегка искривленные каналы впускных литников наиболее предпочтительны, так как они допускают возможность чистой отделки впускного литника. Широкие впускные литники оказывают благоприятное влияние на механические свойства готовых изделий (из-за меньшей ориентации частиц пресс-материала при впрыске). Четких рекомендаций по выбору правильного расположения литниковой системы и ее конструкции в настоящее время нет, так как на это оказывает влияние множество факторов, такие как тип перерабатываемого материала, конфигурация изделия, объем изделия и т. д.

Ниже перечислены некоторые рекомендации по выбору литниковой системы: 1) к каждому изделию должен подводиться один литник, так как при большем числе литников возникает опасность возникновения линий спая фронтов течения расплава; 2) если требуется два литника, то путем соответствующего определения размеров входных литников соединительные швы (линии спая) следует располагать в местах наибольшей толщины изделия; 3) длинные изделия должны оформляться впрыском материала в торец, а не в середину оформляющей полости; 4) изделия прямоугольного сечения по возможности необходимо формировать впрыском расплава с одной стороны оформляющей полости литьевой пресс-формы; 5) изделия круглой формы можно формировать впрыском в центр оформляющей полости или через кольцевой впускной литник; 6) по возможности следует избегать применения точечных литников; 7) длины литниковых каналов, особенно при впрыске сверху, нужно выбирать как можно меньшими, так как усилие впрыска прямо пропорционально сопротивлению литниковых каналов; 8) по возможности избегать искривлений или сильных перегибов литникового канала, так как в противном случае увеличивается давление впрыска и износ пресс-форм; 9) впускные литники необходимо располагать непосредственно перед оформляющей полостью, так как в этом случае по месту соединения впускного литника с изделием осуществляется отделение литника от изделия; 10) в многогнездных формах длины литниковых каналов ко всем гнездам должны быть одинаковыми.

Размеры впускного литника и литникового канала необходимо определять с учетом массы изделия, положения литника, давления впрыска, температуры пресс-формы, пластичности и термочувствительности пресс-материала. Если литниковый канал длинный и узкий, то перерабатываемый материал быст-

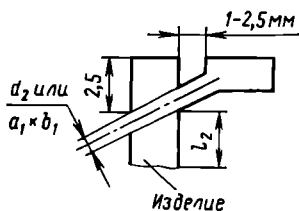


Рис. 6.39. Впускной литник туннельного типа.

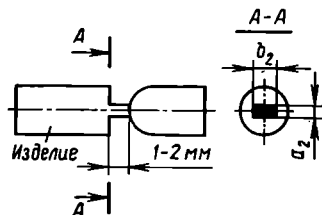


Рис. 6.40. Впускной литник прямоугольного сечения.

рее разогревается (вследствие большого диссипативного тепло-выделения), но при этом возникает опасность преждевременного отверждения. Диаметр канала оказывает большее влияние на гидравлическое сопротивление, чем его длина; наиболее благоприятное соотношение длины литникового канала к диаметру равно 9:1.

Так как скорость отверждения пресс-материала при литьевом прессовании имеет большое значение, то необходимо сечение впускного литника выбирать таким, чтобы обеспечить впрыск разогретого материала под давлением в течение 15—30 с. Секундная пропускная способность поперечного сечения впускного литника должна составлять 0,6—1,0 г/мм², чтобы исключить опасность перегрева. С учетом этих ограничений площадь поперечного сечения впускного литника $s_{вл}$ (мм²) определяется по следующей эмпирической формуле:

$$s_{вл} = V_{и} \pm 50\%$$

где $V_{и}$ — объем изделия; знак (+) относится к тонкостенным крупным изделиям, а (—) — к тонкостенным мелким изделиям.

Согласно [192], рекомендуются следующие размеры впускного литника при переработке реактопластов (рис. 6.39 и 6.40): $a_1 = 0,4 \div 0,6$ мм; $a_1 = 9 \div 12$ мм; $d_2 = 1 \div 3,5$ мм; $l_2 = 1,5$ мм.

Ниже приведено соотношение массы готового изделия и размеров впускного литника (см. рис. 6.40, 6.41):

Масса изделия, г	a_2 , мм	b_2 , мм
До 10	0,6—0,8	3,5—6
10—20	1	6
20—40	1	7
40—150	1	11
150—300	1,5	20

Значение $a_3 = 0,6 \div 1,5$ мм, а b_3 должно достигать приблизительно ширины изделия.

Рекомендуется выбирать следующую глубину канала впускного литника: при зернистых и тонковолокнистых наполнителях (минеральная мука, древесная мука, древесные волокна, асбестовые волокна) 0,5 мм; при грубоволокнистых наполните-

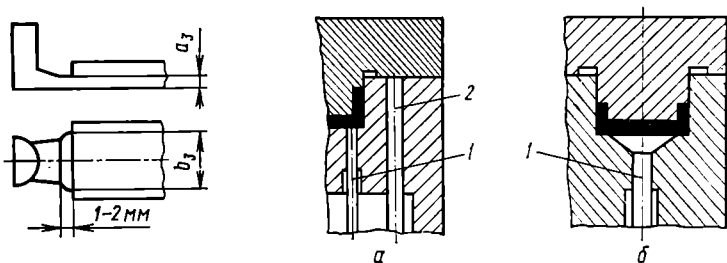


Рис. 6.41. Сечение литникового канала.

Рис. 6.42. Выталкивающие стержни цилиндрической (а) и конической (б) формы:

1 — выталкивающие стержни; 2 — направляющая колонна.

лях (текстильные волокна, текстильная крошка и др.) — 0,8 мм.

При выборе размеров литьевых цилиндров следует учитывать способ впрыска (сверху или снизу). При литьевом прессовании с впрыском сверху площадь поперечного сечения литьевого цилиндра должна быть не меньше, чем максимальная площадь поперечного сечения изделия в плоскости разъема, так как в противном случае не обеспечивается надежное смыкание литьевых пресс-форм. В этом случае диаметр литьевого цилиндра уже определяется размерами готового изделия. Диаметр литьевого цилиндра и его высота могут изменяться в определенных пределах. Опытные данные говорят о том, что для изделий круглой формы отношение площади поперечного сечения изделия (см²) к объему изделия (см³) равно 0,2, а отношение высоты цилиндра H к диаметру цилиндра D равно 0,5. Отсюда следует, что в литьевом цилиндре наибольшая высота столба пресс-материала, находящегося под давлением, должна составлять 0,5 D для обеспечения надежного литьевого прессования. Верхняя граница высоты заполнения должна быть несколько увеличена в случае предварительного подогрева пресс-материала, применения высоких скоростей литьевого плунжера и высоких давлений и при увеличении площади поперечного сечения впускного литника.

С достаточной для практических целей точностью можно пользоваться следующими соотношениями:

$$\text{Диаметр литьевого цилиндра} = \sqrt[3]{\frac{\text{Объем всех изделий с литником}}{\text{Площадь поперечного сечения цилиндра}}} \quad (6.18)$$

$$\text{Ход литьевого плунжера} = k_3 \times \frac{\text{Объем всех изделий с литником}}{\text{Площадь поперечного сечения таблетки}} \quad (6.19)$$

Высота литьевого цилиндра должна быть в 2,5 раза больше его диаметра. Диаметр таблетки должен быть на 5—10% меньше диаметра литьевого цилиндра [193].

6.7.7. Нагрев пресс-форм

Изготовление высококачественных изделий из реактопластов требует не только приложения достаточно высокого давления, но и строгого соблюдения теплового режима. К нагреву пресс-форм, независимо от способа нагрева, предъявляются следующие требования: 1) постоянство температуры пресс-формы в процессе формирования изделий, поддерживаемое путем соответствующего регулирования; 2) равномерное распределение температурного поля на пуансоне и матрице, достигаемое рациональным расположением нагревательных каналов. Различают прямой и косвенный нагрев пресс-форм.

Косвенный нагрев пресс-форм осуществляется без нагревателей и основан на использовании теплопроводности. При этом пресс-формы крепятся к прессу с помощью нагревающих плит. Разумеется, при этом способе нагрева трудно поддерживать точную температуру прессования. Кроме того, этот способ требует больших затрат тепла, так как имеют место большие потери его в окружающую среду. Однако, несмотря на указанные недостатки, косвенный метод нагрева пресс-форм используется при получении опытных образцов, так как при этом применяются только простые пресс-формы (съемные и полустационарные).

При прямом нагреве создаются лучшие условия нагрева, так как каналы или отверстия для приема теплоносителя (воды, пара, масла и др.) расположены в пуансоне и матрице. Прямой способ нагрева дает возможность быстрого разогрева пресс-формы и достаточно точного регулирования ее температуры. Он применяется, как правило, в пресс-формах для крупносерийного или массового производства, а также в крупногабаритных пресс-формах. Для снижения тепловых потерь в большинстве случаев внешние поверхности пресс-формы теплоизолируют, а между пресс-формой и плитой пресса помещают теплоизоляционные прокладки (плиты).

При прямом и косвенном способах нагрева пресс-форм применяют различные теплоносители. В табл. 6.2 перечислены преимущества и недостатки применяемых теплоносителей и способов нагрева пресс-форм.

На предприятиях по переработке пластмасс нагрев пресс-форм горячей водой применяется очень редко. В большинстве случаев используются электрические нагреватели сопротивления, так как при этом температура легко регулируется автоматически.

Независимо от типа нагревателей необходимо обеспечить удельную мощность нагрева $3\text{--}12\text{ Вт/см}^2$ и избежать утечек тепла. Мощность нагрева зависит от следующих факторов: 1) массы пресс-формы; 2) температуры прессования; 3) потерь тепла пресс-формой в окружающую среду; 4) необходимого времени разогрева.

Таблица 6.2. Преимущества и недостатки различных теплоносителей и способов нагрева пресс-форм

Теплоносители, способы нагрева	Преимущества	Недостатки
Газ	Простота и дешевизна	Неравномерный нагрев; повышенная опасность утечки газа; большое время разогрева; опасность местного перегрева пресс-формы; колебания давления газа, затрудняющие регулирование температуры; тепловая перегрузка атмосферы помещения
Электрические нагреватели сопротивления	Чистота, легкость регулирования, небольшие теплопотери в окружающую среду, невысокая стоимость, безопасность производства, легкость установления различных температур переработки	Длительность разогрева; необходимость точного расположения нагревательных элементов, тщательной изоляции всех токопроводящих частей
Индукционные нагреватели	Равномерное распределение температуры, быстрота нагрева, безопасность (низкое напряжение тока питания)	Применимы только в крупных пресс-формах, высокая стоимость
Пар	Дешевизна, быстрота нагрева и охлаждения (путем переключения магистрали на охлаждающую воду)	Нарушение температурного режима из-за образования конденсата и неплотности соединений; неравномерность разогрева, потери тепла в окружающую среду за счет теплового излучения
Горячая вода	Быстрый разогрев, равномерность распределения температур при достаточно больших и равномерно распределенных нагревательных каналах	Возможность только централизованного регулирования температуры; имеет смысл применять только на крупных прессах; переработка пресс-материалов с сильно отличающимися свойствами невозможна, необходимость в котельных установках

Для разогрева 1 кг массы пресс-формы требуется до 25 Вт тепла [193] без учета теплопотерь в окружающую среду. Путем применения теплоизоляции потери тепла можно снизить на 10—60%. Мощность разогрева P_p (Вт) равна

$$P_p = m_p P_{уп} \quad (6.20)$$

где m_p — масса пресс-формы (кг); $P_{уп}$ — удельная мощность, необходимая для разогрева 1 кг пресс-формы (Вт/кг).

Необходимое количество нагревательных элементов n_n составляет

$$n_n = \frac{m_p P_{уп}}{s_n P_{уп}} \quad (6.21)$$

где s_n — площадь поверхности нагревательного элемента (см²); $P_{уп}$ — удельная мощность нагревательного элемента (Вт/см²).

В работе [194] приведены расчеты мощности нагревательных элементов. Мощность обогрева $P_{об}$ равна

$$P_{об} = \frac{c_1 m_{п}}{t} (T_2 - T_1) + \alpha_1 s_{п} \left(\frac{T_2 + T_1}{2} - T_1 \right) \quad (6.22)$$

где c_1 — удельная теплоемкость материала пресс-формы; T_2 — температура пресс-формы; T_1 — комнатная температура; $s_{п}$ — площадь поверхности теплоизлучения; t — время разогрева; α_1 — коэффициент теплопроводности материала пресс-формы.

Мощность, необходимая для компенсации теплотерь $P_{п}$, равна

$$P_{п} = \alpha_1 s_{п} (T_2 - T_1) \quad (6.23)$$

Площадь поверхности $s_{п}$, требуемая для передачи тепла от нагревательных каналов к нагреваемой среде, определяется из соотношения

$$s_{п} = \frac{P_{п}}{\alpha_2 (T_3 - T_2)} \quad (6.24)$$

где α_2 — коэффициент теплопроводности между нагреваемой средой и нагревательным каналом; T_3 — температура нагреваемой среды.

Для приближенных расчетов можно принимать следующие значения величин, входящих в приведенные выше формулы: $c_1 = 502$ Вт·с/кг·К; $\alpha_1 = 0,015$ (при наложении изоляции на пресс-формы); $\alpha_2 = 1,5 - 2$ кДж/(м²·К·с) (вода — сталь); $\alpha_2 = 1,5 - 5$ кДж/(м²·К·с) (пар — сталь); $\alpha_2 = 0,02 - 0,05$ кДж/(м²·К·с) (трубчатые электронагреватели — сталь).

6.7.8. Выталкивающие системы пресс-форм

Для удаления готовых изделий после раскрытия пресс-формы в большинстве случаев необходимы выталкиватели в виде штифтов. В их задачу входит передача непосредственно на из-

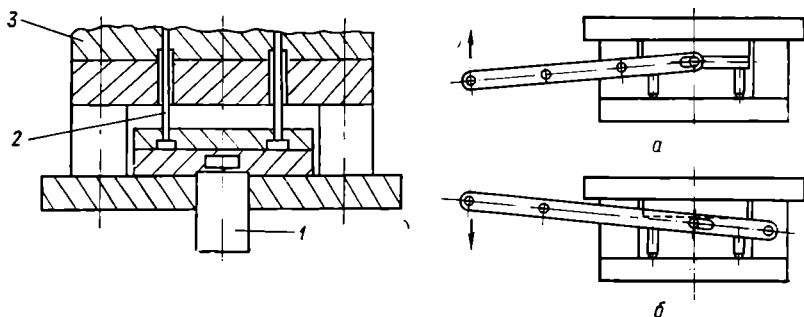


Рис. 6.43. Плита выталкивающей системы со штоком:

1 — шток; 2 — выталкиватель; 3 — обойма матриц.

Рис. 6.44. Выталкивающие системы рычажного типа:

а — двухрычажная; б — однорычажная (стрелками показано направление действия выталкивающей силы).

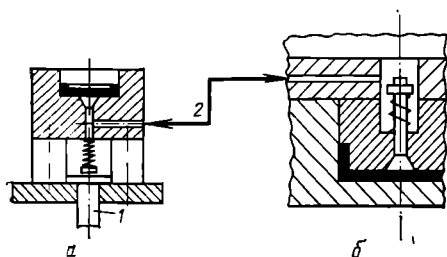


Рис. 6.45. Выталкиватели конического типа:

а — выталкивание плунжером; *б* — выталкивание сжатым воздухом; *1* — выталкивающий плунжер; *2* — подача сжатого воздуха.

деля или через промежуточные элементы усилий, необходимых для удаления изделия. На рис. 6.42 показаны выталкиватели цилиндрической и конической формы.

Выталкиватели совершают в пресс-форме возвратно-поступательное движение по ходовой посадке, причем эта посадка должна исключать затекание жидкой смолы в посадочные отверстия. Во избежание матовых пятен на изделиях выталкиватели должны проникать в тело изделия на глубину не более 0,1—0,2 мм. Это следует учитывать при установке выталкивателей в составных пресс-формах. На рис. 6.43—6.45 показаны различные типы и способы крепления выталкивателей.

ГЛАВА 7

Формование изделий из листовых термопластов

Несмотря на то, что формование изделий из листовых термопластов — один из старейших процессов переработки пластмасс, который начал применяться еще в конце прошлого века [86], до настоящего времени этот метод по сравнению с большинством других мало изучен.

Использование изделий из листовых термопластов ограничивалось предметами бытового назначения, упаковкой, санитарно-технической продукцией, элементами декоративной отделки, неотчетственными расчетами показали, что при определенной серийности производства и габаритах формованные изделия из листовых термопластов по себестоимости гораздо дешевле аналогичных литых или полученных методов раздува [202, 210]. Исследование же физических основ формования листовых термопластов, выявление взаимосвязи технологических параметров и особенностей аппаратного оформления процесса с качеством готовых изделий позволяет существенно расширить их область применения, заранее, еще на стадии проектирования и разработки технологии процесса формования, прогнозировать те или иные характеристики изделия и направленно их изменять.

По диаграмме состояния полимера, т. е. зависимости прочности при растяжении и деформации от температуры можно произвести оценку перерабатываемости и применимости того или иного полимера.

Для формования листовых термопластов наибольший интерес представляет область высокоэластического состояния, которая для указанных групп материала занимает относительно широкий интервал температур. Прочность при растяжении в этой области значительно меньше прочности в твердом состоянии (при комнатной температуре). Деформация растяжения при этом проходит через максимум и значительно превышает деформацию того же материала в твердом состоянии. В связи с этим в высокоэластической области имеется такой интервал температур, в котором прочность при растяжении настолько мала, а деформация растяжения настолько велика, что становится возможным осуществление большой вытяжки при относительно небольшом усилии формования. Состояния полимеров, проявляющиеся при их нагревании, повторяются в обратной последовательности при охлаждении, причем заданная форма, например при термоформовании в области высокоэластического состояния, при соответствующем фиксировании (охлаждение без снятия усилия формования) сохраняется. Таким образом, поведение полимера при нагреве и охлаждении используется при формовании листовых заготовок.

Физически высокоэластическое состояние объясняется наличием микроброуновского движения макромолекул полимера, а именно вращением сегментов макромолекул вокруг их главных валентных осей. Следует отметить, что переходы «стеклообразное состояние — высокоэластическое состояние» и «высокоэластическое состояние — вязкотекучее состояние» в связи с существованием спектра распределения масс макромолекул не являются фиксированными точками, а занимают определенные области.

После формования в высокоэластической области и последующего охлаждения замораживаются внутренние напряжения в изделии, которые тем больше, чем ниже температура формования, чем выше скорость формования и чем быстрее происходит процесс охлаждения изделия. Эти замороженные напряжения при нагреве до температур, близких к температуре стеклования, приводят к изменению формы изделия (короблению), которое называют термоупругим последствием. Технологические условия термоформования изделий выбирают таким образом, чтобы указанный эффект был как можно меньше. При этом достигается минимум внутренних напряжений и резко увеличивается интервал температур применения изделий.

Иногда, однако, указанный эффект специально усиливают. Так поступают при производстве термоусадочных рукавных

пленок, муфт, фитингов. В этой связи следует отметить, что наряду с описанными выше методами формования в области высокоэластической деформации, которые называют методами горячего формования листовых термопластичных полимерных материалов, применяются в промышленности переработки пластических масс так называемые методы холодного формования листовых полимеров. При холодном формовании для формообразования используется механическая вытяжка, и процесс формования протекает с высокой скоростью. При этом за счет превращения механической энергии в тепловую происходит частичный разогрев формируемой заготовки. Этот метод производительнее, чем метод горячего формования, однако он может быть применен лишь для особого ассортимента изделий и не пригоден для переработки хрупких полимеров.

При горячем формовании аморфных термопластов процесс протекает в относительно широком интервале температур. При переработке этим же методом частично-кристаллических полимеров процесс протекает в более узком интервале температур. С достижением температуры стеклования в аморфной части хотя и имеет место микроброуновское движение, однако достижению вязкопластических свойств препятствует усиливающееся воздействие кристаллических частей полимеров. Наконец, в непосредственной близости от температуры плавления кристаллов в очень узком интервале температур наблюдается некоторое снижение разрывной прочности и увеличение деформации растяжения, т. е. только в узком интервале температур возможно формование частично-кристаллических полимеров горячим методом.

7.2. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ, ОТФОРМОВАННЫХ ИЗ ЛИСТОВЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

Методы формования листовых термопластов применяются для производства таких изделий, изготовление которых технически и экономически невыгодно (или невозможно) другими методами, например изготовление упаковочных материалов и изделий больших габаритных размеров в небольшом количестве.

Упаковочные средства зачастую предназначены лишь для разового использования, поэтому они должны быть как можно более дешевыми. Выполнение этого требования обеспечивается применением вакуум-формования листовых (или пленочных) материалов в многогнездных формах. Агрегаты для упаковки в настоящее время специализированы на изготовлении определенных изделий. Они представляют собой комбинацию различных устройств, в число которых входит и узел вакуумного формования. Такого рода агрегаты могут состоять из экструзионной линии, машины для формования заготовки, устройства для

Таблица 7.1. Сопоставление методов термоформования и литья под давлением

Сравниваемые показатели	Целесообразность применения методов	
	термоформования	литья под давлением
Количество изделий, начиная с которого рентабельно производство	Начиная с 1 изделия — в зависимости от способа формования, формы, сложности изделия	От 20000 до 100000 изделий — в зависимости от степени сложности изделия
Размер изделий	Начиная с небольших размеров площади поверхности изделия до 15 м ² — в зависимости от способов формования, габаритов установки, числа позиций и т. д.	Начиная с очень маленьких площадей поверхности до 1,5 м ² — в зависимости от размеров машины и гнездыши форм
Сложность конструкции изделий	Несложные и неглубокие изделия без уступов по толщине	Изделия большой сложности, с арматурой, ступенчатые по толщине; толщина стенок $\geq 0,5 \div 0,6$ мм; максимальное отношение толщины стенки к длине пути течения равно глубине изделия, а минимальное — толщине стенки
Качество изделий	В зависимости от способов формования имеет место разнотолщинность; качество поверхности относительно хорошее только со стороны контакта с поверхностью формы; термоупругое последствие; точность размеров изделия зависит от толщины листа и радиуса контура изделия	Толщина стенок, качества внешней поверхности, размеры изделий соответствуют конструкции и качеству литьевой формы
Исходный материал	Относительно дорогие пленки и листы	Относительно дешевый гранулят
Формующий инструмент	Дешевый	Дорогой
Оборудование (машины)	В зависимости от способов формования машины с ручным управлением, специальные машины-автоматы или линии	Универсальные машины различных типоразмеров
Предварительная подготовка исходного материала	Подготовка заготовки в зависимости от способов формования, например, резка, предварительный подогрев	Не требуется
Последующая обработка	Отделение изделий от ранта и перемычек	Удаление литников или облоя
Отходы	До 50%	Незначительные (на литниковую систему)

заполнения заготовки упаковываемым материалом и механиз-
ма упаковки и т. д.

В табл. 7.1 дано сопоставление целесообразности изготов-
ления крупногабаритных изделий методами термоформования
листовых полимеров и литья под давлением гранулированных
полимеров.

7.3. МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ ЛИСТОВЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ В ОБЪЕМНЫЕ И ПЛОСКИЕ ИЗДЕЛИЯ

7.3.1. Классификация. Общие положения

В общем случае, чтобы получить изделие из листовой за-
готовки, ее нагревают до температуры, соответствующей высо-
коэластическому состоянию термопласта. Затем подвижно или
неподвижно закрепленную по контуру в зажимном устройстве
нагретую заготовку устанавливают на формующий инструмент.
Оформление заготовки в изделие происходит под действием
перепада давления, который создается между поверхностью
заготовки, обращенной к формующему инструменту, и ее про-
тивоположной поверхностью. Перепад давления может быть
создан различными способами: вакуумированием полости меж-
ду оформляющей поверхностью формующего инструмента и за-
готовкой, созданием избыточного пневматического, парового или
гидравлического давления, на поверхность заготовки, наконец,
давлением на заготовку с помощью специальных механических
пуансонов.

В момент вытяжки заготовки в материале возникают упру-
гие силы, которые после снятия давления формования стремят-
ся вернуть изделие к первоначальной плоской форме заготовки.
Чтобы зафиксировать конфигурацию отформованного изделия,
необходимо, не снимая давления формования, охладить изделие
до температуры, ниже температуры стеклования.

Такова традиционная схема формования, получившая в на-
стоящее время наибольшее распространение.

Однако в рамках этой общей схемы разработано множество
методов формования изделий, позволяющих проще, экономичнее
и качественнее изготовить то или иное конкретное изделие,
полнее использовать возможности имеющегося в распоряжении
формующего оборудования. Все эти методы формования можно
подразделять по следующим признакам: по виду нагрева заго-
товки, по виду применяемого зажимного устройства, по спосо-
бу создания формующего давления, по виду формования и по
конструктивным особенностям формующего инструмента. Клас-
сификация методов формования листовых и пленочных термо-
пластов в высокоэластичном состоянии [204] приведена на
рис. 7.1. Настоящая классификация не охватывает всех мето-
дов формования, так как творческий подход к изготовлению
какого-либо оригинального изделия достаточно часто приводит

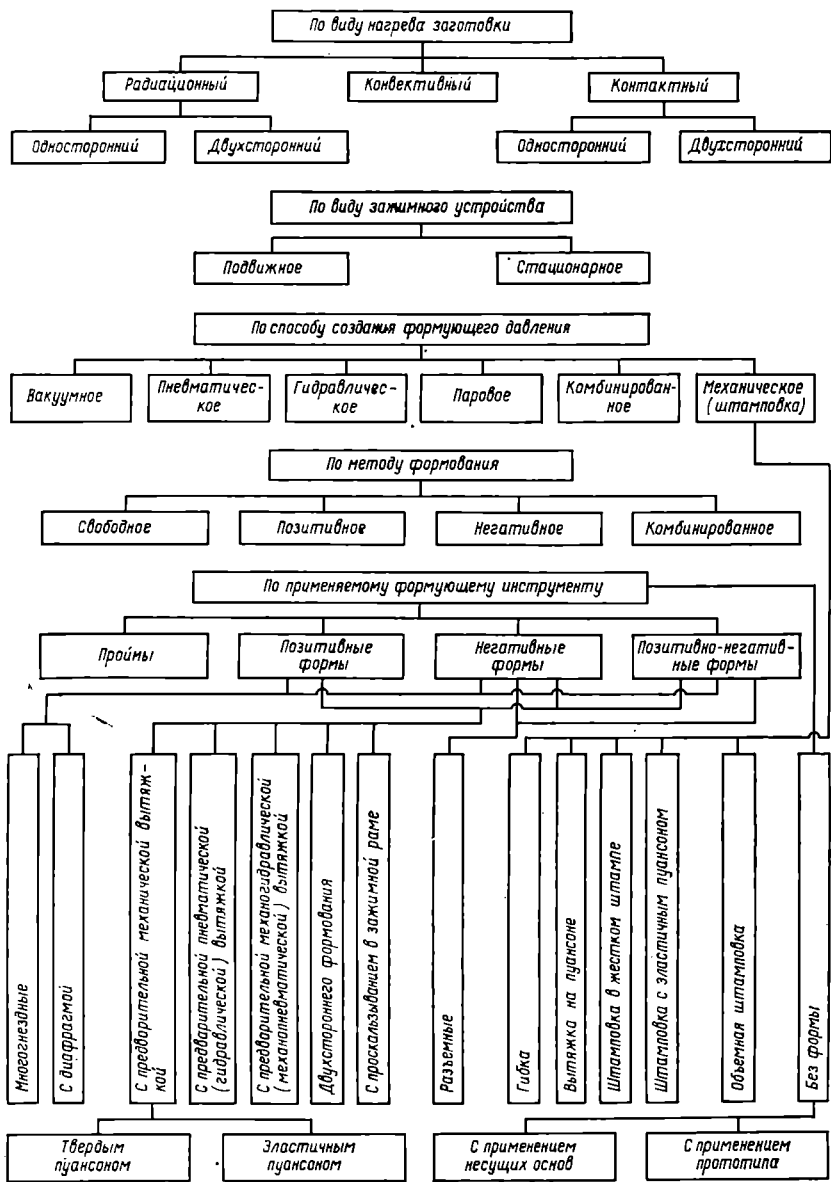


Рис. 7.1. Классификация методов формования листовых и пленочных термопластов в высокоэластическом состоянии.

к появлению нового метода формования. Однако можно утверждать, что здесь собраны основные наиболее распространенные методы, используемые в производственных условиях.

Наряду с традиционной схемой формования в середине 70-х годов получила распространение новая схема формования листовых термопластов. Чаще всего в литературе эту схему называют методом «холодного» формования. Согласно этому методу, листовая заготовка при комнатной температуре или подогретая до температуры на 20—30° ниже температуры стеклования данного термопласта устанавливается над матрицей, прижимается по контуру, а затем формируется путем приложения механического давления специальным пуансоном. Таким образом, в отличие от традиционной схемы при «холодном» формовании полностью отсутствует стадия охлаждения готового изделия и существенно сокращена (или исключена вовсе) стадия нагрева листовой заготовки. Кроме того, благодаря существенным различиям в характере полей напряжений (что будет показано ниже) при традиционном и «холодном» способах формования при «холодном» формовании не возникает разнотолщинности изделий; мало того, один из методов «холодного» формования позволяет как бы калибровать толщину стенки изделия. Еще одним преимуществом описываемого способа является возможность переработки им частично- и высококристаллических термопластов, формование которых по традиционной схеме существенно затруднено. По чисто формальному сходству «холодное» формование можно сравнить с штамповкой объемных изделий из листового металла и классифицировать по следующим наиболее существенным признакам: наличию или отсутствию подогрева заготовки и формованию с калиброванием или без калибрования боковой стенки изделия.

Для получения плоских изделий из листовых термопластов используются методы вырубки. На практике используется четыре метода вырубки: а) без подогрева материала и инструмента; б) без подогрева материала, но с подогревом инструмента; в) с подогревом материала, но без подогрева инструмента; г) с подогревом материала и инструмента. Вырубка может осуществляться контурным ножом или штампом.

7.3.2. Гибка листовых заготовок

Гибка листовых полимерных заготовок производится на простых гибочных устройствах, причем по линии будущего изгиба заготовка предварительно разогревается с помощью инфракрасного излучения, горячим воздухом или нагревательными элементами. Такой способ гибки листовых заготовок показан на рис. 7.2.

На рис. 7.3 показано соотношение размеров при гибке листовых заготовок. Технологические режимы гибки листовых заготовок из различных полимеров приведены ниже:

Полиэтилен	378—413
Полипропилен	433—443
Непластифицированный поливинилхлорид	393—413
Полиметилметакрилат	393—413
Полиформальдегид	433—443

Возможна гибка листовых заготовок из аморфных полимеров толщиной до 12 мм, а заготовок из частично-кристаллических полимеров — до 2 мм. При больших толщинах заготовок применяется так называемый метод сварки углов (рис. 7.4). К листовой заготовке прижимают сварочный пуансон, нагретый до 473—523 К (в зависимости от типа полимера), до тех пор, пока он не войдет в заготовку за счет плавления полимера на глубину порядка до 0,7δ. После этого удаляют сварочный пуансон и сгибают листовую заготовку, причем поверхности V-образного углубления свариваются друг с другом.

Гибка листовых заготовок и пленок применяется при изготовлении сварных труб диаметром ≥ 400 мм, при футеровке полимерным материалом стальных труб, емкостей и т. д. Для этих целей заготовку разогревают до необходимой температуры и с помощью специальных шаблонов, например гибочных валков, придают ей соответствующую форму. На рис. 7.5 показана принципиальная схема установки для получения труб из листовых заготовок. При этом разогретый лист термопласта укладывается на полотно ткани, препятствующее короблению заготовки.

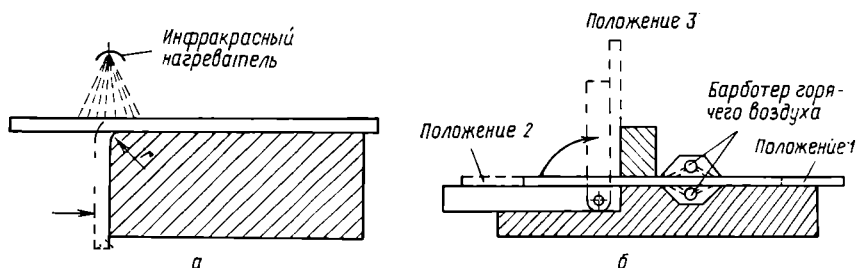
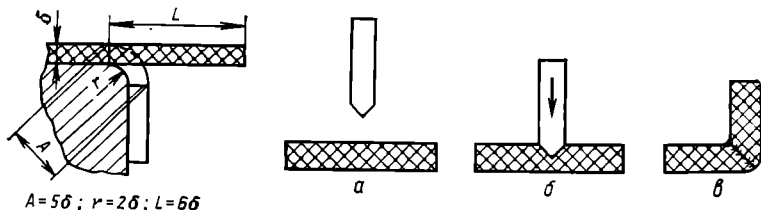


Рис. 7.2. Гибка листовых термопластов:

а — под действием собственного веса; б — с помощью поворотной щеки.



$A=5\delta$; $r=2\delta$; $L=6\delta$

Рис. 7.3. Соотношение размеров при гибке листовых заготовок.

Рис. 7.4. Гибка листовых термопластов с последующей сваркой:

а — исходное положение; б — внедрение нагретого пуансона; в — готовое изделие.

7.3.3. Нанесение тиснений на листовые полимерные заготовки

Тиснение листовых заготовок из полимерных материалов — это механическое формование между матрицей и пуансоном с незначительной степенью вытяжки. Оно служит для получения неглубоких рельефных рисунков или надписей. Этот способ отдельно редко применяется, а в большинстве случаев является составной частью процессов формования при получении изделий или при изготовлении полуфабрикатов (например, тиснение пленки между специальными рельефными валками).

7.3.4. Формование листовых термопластов путем вытяжки заготовок

Формование изделий с помощью механической вытяжки. При этом способе формования разогретый лист или пленка, закрепленные на матрице с помощью прижимной рамы, подвергаются вытяжке пуансоном (рис. 7.6). Чисто механическая вытяжка заготовки применяется довольно редко, например при ручном производстве или для получения модельных образцов. При этом получают изделия с утолщенным дном и сильно утонченными боковыми стенками.

Вакуумное формование. При вакуумном формовании листовая или пленочная заготовки закрепляются над формой с помощью прижимной рамы, разогреваются до высокоэластического состояния, после чего из полости, образованной заготовкой и стенками формы, отсасывается воздух через специальные каналы. Под действием разности давлений над заготовкой и под ней размягченный лист или пленка подвергаются вытяжке, принимая необходимую форму. После охлаждения до температуры, ниже температуры затвердевания полимера, отформованное изделие удаляется. Вакуумирование полости должно производиться быстро. Для быстрого откачивания воздуха наряду с вакуум-насосом в установке для вакуум-формования применяются один или несколько вакуумных ресиверов. Вакуумные

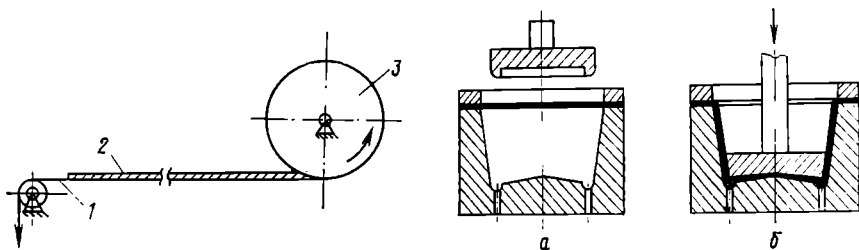


Рис. 7.5. Гибка из листовых термопластов оболочек вращения:
1 — ткань; 2 — лист термопласта; 3 — шаблон.

Рис. 7.6. Формование механической вытяжкой:
а — исходное положение; б — момент окончания процесса формования.

трубопроводы и вентили должны обеспечивать необходимую скорость откачивания. Для получения качественных изделий вакуум должен сохраняться до полного охлаждения отформованного изделия.

Вакуум-формование осуществляется как позитивным, так и негативным методами. Выбор того или иного метода вакуум-формования зависит от следующих факторов: 1) наличия особых требований к качеству внутренней или внешней поверхности изделия; 2) местоположения наиболее тонких стенок изделия, требуемой равнотолщинности изделия; 3) угла наклона вертикальных стенок (при охлаждении после вытяжки на негативной форме заготовка усаживается в форме, а на позитивной форме — обтягивает ее поверхность). При негативном методе формования изделия легче удаляются. При позитивном методе формования съем изделия с формы весьма затруднителен. Поэтому минимальный угол наклона стенок формы в зависимости от типа перерабатываемого материала при позитивном методе формования составляет $3-5^\circ$, а при негативном — $1-2^\circ$.

Простейшая разновидность негативного вакуум-формования представлена на рис. 7.7. Она может быть применена для изготовления изделий относительно несложной геометрической формы. Степень вытяжки таких изделий составляет примерно 2,5. При этом толщина стенок у прижимных рамок наибольшая, так как материал при соприкосновении со стенками формы быстро охлаждается и деформация заготовки протекает за счет вытяжки свободной сферической поверхности днаша формируемой заготовки. В связи с этим по мере удаления от зажимной рамы толщина стенки изделия уменьшается. Наименьшая толщина стенки изделия находится в его углах.

При негативном механо-вакуумном формовании (рис. 7.8) возможно получение изделий с большей степенью вытяжки и лучшей равнотолщинностью стенок. Заготовка после закрепления и разогрева до заданной температуры вытягивается в форму с помощью пуансона (предварительная вытяжка заготовки); в предварительно вытянутом состоянии заготовка не касается стенок формы. Окончательное формование заготовки осуществляется под действием вакуума, подключаемого к полости формы в момент окончания предварительной вытяжки.

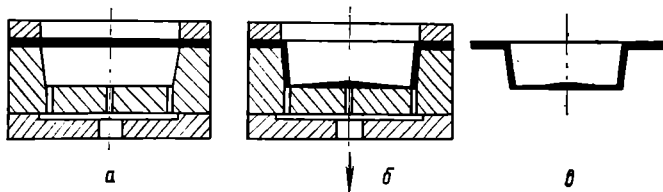


Рис. 7.7. Негативное вакуумное формование:

а — исходное положение; б — формование изделия; в — готовое изделие.

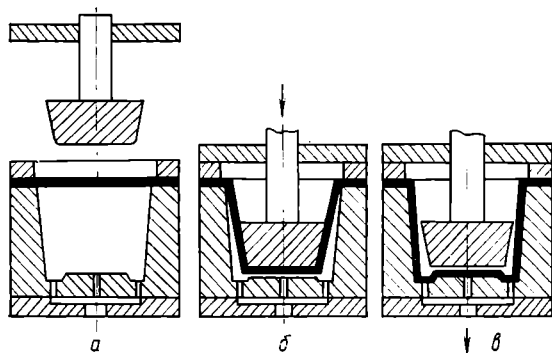


Рис. 7.8. Негативное механо-вакуумное формование:

а — исходное положение; б — предварительная механическая вытяжка; в — окончательное оформление изделия.

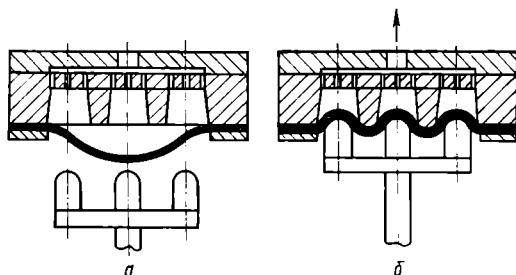
Благодаря применению механической вытяжки возможно формование более толстых листовых заготовок, удастся получать глубокие и равнотолщинные изделия. Путем правильного подбора конструкции пуансона (материала и размеров), глубины предварительной вытяжки и ее скорости, температуры и момента подключения вакуума можно получать изделия, отвечающие предъявляемым требованиям по прочности и равнотолщинности стенок. При этом важно термостатирование пуансона. Если температура пуансона слишком низка, то получают изделия с толстым дном и тонкими стенками. Если же пуансон перегрет, то толщина стенки дна получается слишком малой. Указанный способ наиболее целесообразно применять для получения тонкостенных изделий для упаковки различных продуктов или крупногабаритных изделий с развитой поверхностью (например, внутренних стенок холодильников).

На рис. 7.9 представлена конструкция формы для негативного вакуум-формования с механической вытяжкой нагретой заготовки с помощью специальных штампов. В такой форме достигается равномерная вытяжка за счет провисания листовой заготовки под действием собственного веса. После вытяжки заготовки под действием собственного веса она с помощью штампов вдавливается в оформляющие полости формы (подвергается механической вытяжке), а затем окончательно формируется под действием вакуума. При этом, несмотря на простую конструкцию формы, довольно точно достигается желаемое распределение толщины стенок по высоте.

При использовании формы для негативного вакуум-формования с предварительной пневмомытяжкой заготовки (рис. 7.10) разогретый материал сначала с помощью сжатого воздуха без соприкосновения с другими телами подвергается биаксиальной вытяжке и после этого под действием вакуума втягивается в оформляющую полость формы. Предварительная вытяжка заготовки с помощью сжатого воздуха может быть осу-

Рис. 7.9. Негативное вакуумформование с предварительной вытяжкой за счет провисания заготовки под действием собственного веса:

а — предварительная вытяжка;
б — окончательное оформление изделия.



шествлена также при одновременном создании разрежения над поверхностью заготовки. Однако в этом случае, хотя и достигается большая равнотолщинность, но намного усложняются конструкции установок и формы.

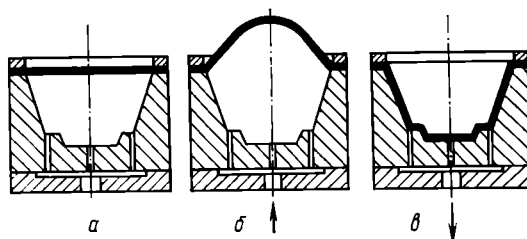
Негативное вакуум-формование как один из вариантов ротационного формования позволяет осуществлять автоматизированное непрерывное производство изделий из листовых и пленочных материалов. Этот способ нашел большое распространение в пищевой и химической промышленности для упаковки различных продуктов. При этом на одном агрегате осуществляются процессы формования, заполнения, сварки крышки, маркировки готовой продукции (рис. 7.11). Производительность таких агрегатов при ширине заготовки до 1300 мм достигает 15000 изделий в час.

При позитивном вакуум-формовании применяемая форма вдавливается в разогретую заготовку. Окончательное формование изделия осуществляется под действием вакуума (рис. 7.12). Четкость контура изделия со стороны соприкосновения заготовки со стенками формы намного выше, чем при негативном вакуум-формовании, вследствие чего на внешней поверхности особенно сильно заметна разнотолщинность. Расстояние между оформляющими полостями при применении многогнездных форм зависит от глубины вытяжки заготовки и должно быть выбрано таким, чтобы исключить образование складок (морщин) на изделии.

На рис. 7.13 представлена конструкция ступенчатой формы для позитивного вакуум-формования. При позитивном вакуум-формовании нельзя говорить о чисто механической вытяжке за-

Рис. 7.10. Негативное вакуумформование с предварительной пневмовытяжкой:

а — исходное положение; *б* — предварительная пневмовытяжка; *в* — окончательное оформление изделия.



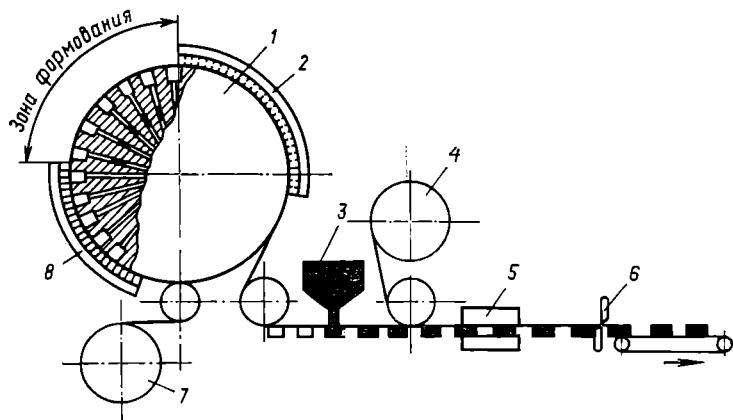


Рис. 7.11. Ротационное формование (линия для упаковки различных продуктов):

1 — формирующий барабан; 2 — охлаждающее устройство; 3 — дозатор; 4 — рулон фольги для укупорки упаковок; 5 — позиция заварки упаковок; 6 — вырубное устройство; 7 — рулон формового термопласта; 8 — нагревательное устройство.

готовки; форма как бы механически способствует вытяжке заготовки. При вытягивании листовой заготовки ступенчатой формой заготовка соприкасается со стенками формы в точках x_1 , x_2 , x_3 , причем формируемый материал тормозится и соответственно растягивается между точками или линиями соприкосновения. После достижения плотного контакта прижимной рамы с формой подключается вакуум и производится окончательное формование изделия. Путем регулирования скорости вытяжки (подъема формы) можно управлять разнотолщинностью изделий.

При позитивном вакуум-формовании с пневматической вытяжкой листовая заготовка после нагрева подвергается свободной предварительной вытяжке сжатым воздухом (свободное формование). Только после этого форма перемещается вверх, и по достижении плотного контакта формы с зажимной рамой производится окончательное формование изделия с помощью вакуума. Преимуществом такого способа формования является то, что исключается преждевременный контакт нагретой заготовки со стенками формы и этим достигается лучшая равно-

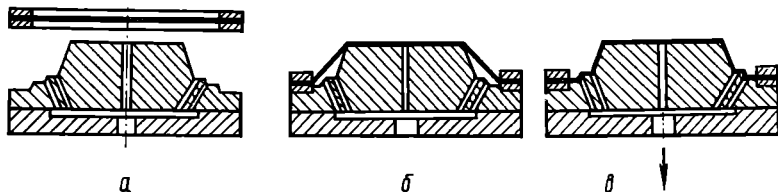


Рис. 7.12. Позитивное вакуумформование:

а — исходное положение; б — подвод пуансона; в — окончательное оформление изделия.

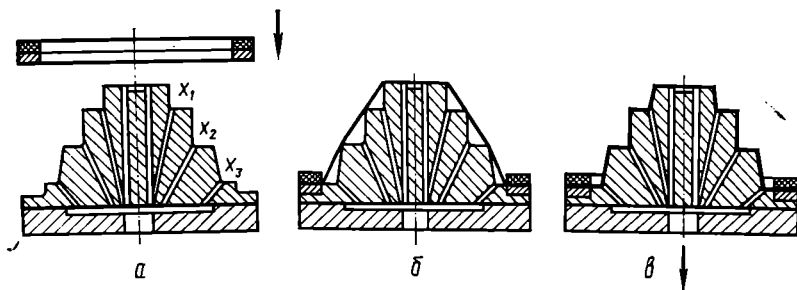


Рис. 7.13. Позитивное вакуумформование ступенчатым пуансоном:

а — исходное положение; б — подвод пуансона; в — окончательное оформление изделия.

толщинность, тем более что величина предварительной вытяжки может регулироваться изменением давления сжатого воздуха, скорости его подачи и температуры заготовки. Благодаря биаксиальной вытяжке заготовки в значительной степени исключается ориентация макромолекул в готовом изделии.

Сущность еще одного метода заключается в том, что перемещением подъемника формы создается избыточное давление воздуха в полости между заготовкой и формой, которое и совершает работу предварительной вытяжки (рис. 7.14).

Другой способ вытяжки заготовки состоит в использовании аэродинамического эффекта (рис. 7.15). Он основан на том, что при подъеме формы горячий воздух нагнетается в пространство между заготовкой и формой, чтобы исключить преждевременный контакт нагретой заготовки с холодными стенками формы. Регулированием потока, его направления и температуры воздуха можно управлять равнотолщинностью изделий и получать изделия сложной конфигурации.

Пневмоформование. Листовые заготовки формуются также чисто пневматическим способом (рис. 7.16). Формование производится давлением сжатого воздуха, подаваемого в полость, образованную пневмокамерой и заготовкой. Преимуществами этого способа формования являются: 1) высокое давление формования (до 2,5 МПа); 2) высокая точность размеров изделия и четкость контура; 3) хорошая равнотолщинность; 4) короткое время цикла и, следовательно, высокая производительность; 5) возможность формования толстостенных заготовок ($\delta > 1,5$ мм) и крупногабаритных изделий. Однако при этом стоимость формы возрастает, так как форма, испытывающая повышенное давление, должна обладать увеличенной прочностью.

Негативное пневмоформование без механической предварительной вытяжки (см. рис. 7.16) или с механической предварительной вытяжкой заготовки (рис. 7.17) сравнимо с аналогичными методами вакуум-формования, однако контуры окантовок оформляются лучше. При позитивном пневмоформовании (рис.

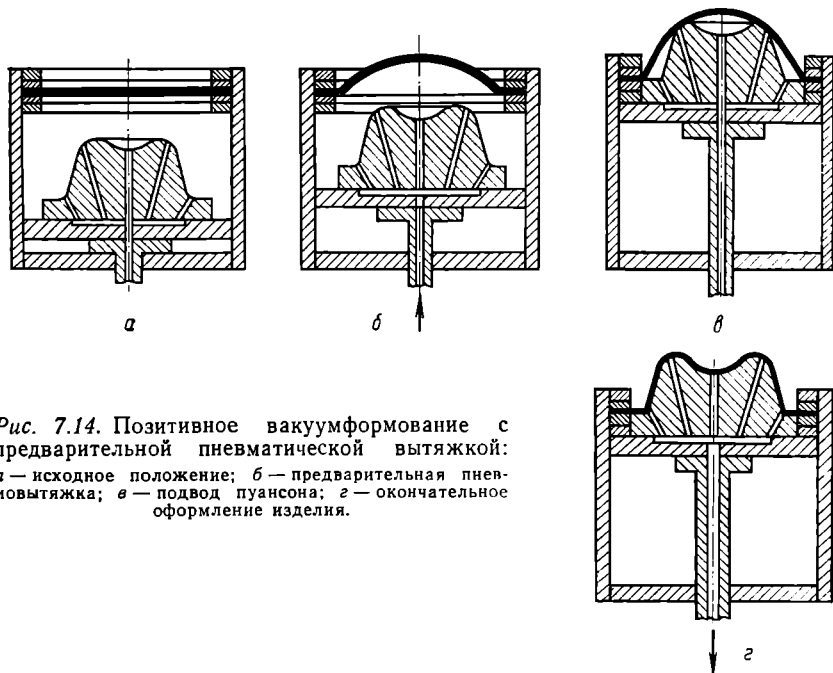


Рис. 7.14. Позитивное вакуумформование с предварительной пневматической вытяжкой: а — исходное положение; б — предварительная пневмовытяжка; в — подвод пуансона; г — окончательное оформление изделия.

7.18) процесс протекает аналогично позитивному вакуум-формованию.

В табл. 7. 2. указаны области применения и дана оценка различных способов горячего формования листовых и пленочных материалов.

Приведенные способы термоформования листовых термопластичных материалов можно комбинировать друг с другом и таким образом подбирать наиболее целесообразные методы изготовления того или иного изделия. Так, на практике применяется комбинация механического с пневматическим или вакуумного с пневматическим способов.

Широко применяется комбинация негативного и позитивно-го способов формования листовых термопластов, т. е. так назы-

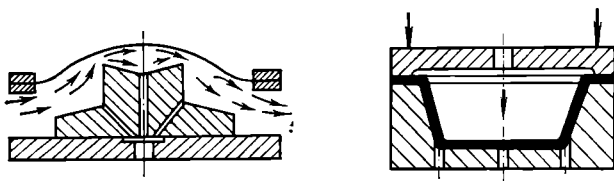


Рис. 7.15. Принцип формования с применением воздушной подушки.

Рис. 7.16. Негативное пневмоформование.

Таблица 7.2. Характеристика различных способов термоформования и области их применения

Способ формования	Характеристика способа, области применения
Механическое формование	Может быть осуществлено ручным способом; незначительная четкость контура изделий; толстое днище и неконтролируемое утонение стенок
Вакуум-формование	Ограничивается толщиной стенок изделия ≤ 2 мм; для окончательного формования используется только вакуум; применяются негативные и позитивные способы формования с механической или пневматической предварительной вытяжкой
Пневмоформование	Высокое давление формования; возможно формование изделий толщиной > 2 мм; четкость контура изделий; точность размеров; применимы негативные и позитивные методы с механической и пневматической предварительной вытяжкой
Негативное формование	Сильное уменьшение толщины днища; хорошее качество внешней поверхности изделий; незначительная конусность изделий, формирующие гнезда могут быть расположены на близком расстоянии друг от друга
Позитивное формование	Значительное утонение стенки в местах зажима; лучшее качество внутренней поверхности; большая конусность стенок формы
Механическая предварительная вытяжка	Можно изменять ступенчатость стенок; средняя глубина вытяжки
Пневматическая предварительная вытяжка	Биаксиальная предварительная вытяжка без соприкосновения с металлическими поверхностями; равномерность вытяжки; регулируемость разнотолщинности; при позитивном способе достигается экстремальная глубина вытяжки

ваемый двухсторонний способ формования (рис. 7.19). Такой способ применяется для производства деталей внутренней облицовки стенок холодильников. Существуют также способы формования пористых заготовок (например, пенопластов) или

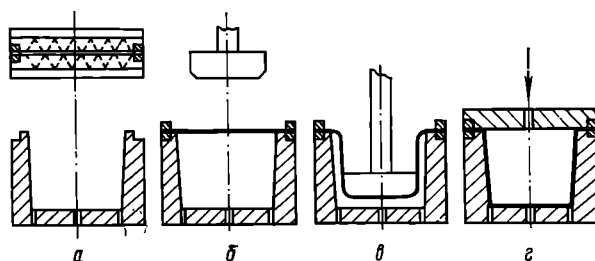


Рис. 7.17. Негативное пневмоформование с предварительной механической вытяжкой:

а — радиационный нагрев заготовки; **б** — подвод плунжера для вытяжки; **в** — предварительная механическая вытяжка; **г** — окончательное оформление изделия.

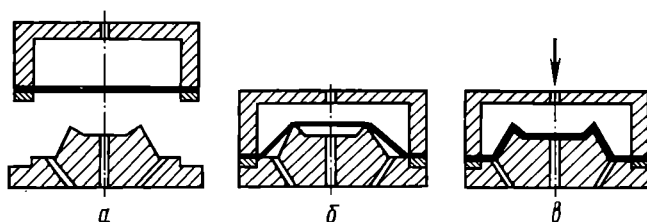


Рис. 7.18. Позитивное пневмоформование:

a — исходное положение; *б* — подвод пневмокамеры; *в* — окончательное оформление деля.

перфорированных заготовок, которые воздухопроницаемы и поэтому не могут быть отформованы ни вакуумным способом, ни пневматическим. Такие заготовки формуются с использованием резиновых прокладок (способ формования «с помощью резиновых прокладок»).

Способ формования листовых заготовок с проскальзыванием их в зажимной раме (рис. 7.20) отличается от рассмотренных ранее тем, что применяется упругая (демпфирующая) струбцина, которая, хотя и фиксирует заготовку, однако в процессе формования позволяет формируемому листу проскальзывать и втягиваться в оформляющую полость формы. Поэтому получаются равнотолщинные изделия. При этом способе максимально возможное значение коэффициента формования равно 1, а значение степени вытяжки — 3,5—4,5. Различают две разновидности способа формования изделий из листовых материалов с проскальзыванием заготовки: глубокая свободная протяжка и протяжка на матрицу. Глубокая протяжка листовых заготовок заимствована из металлообрабатывающей промышленности. Этот метод характеризуется тем, что листовая заготовка с помощью специального штампа протягивается через пройму (зажимное кольцо) в свободное пространство. Зазор между штампом и проймой составляет $(1,1 \div 1,3)\delta$, где δ — толщина листовой заготовки.

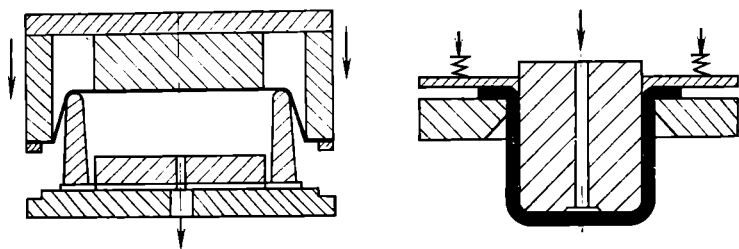


Рис. 7.19. Двухстороннее формование.

Рис. 7.20. Формование с проскальзыванием заготовки в зажимной раме.

7.3.5. Холодное формование листовых заготовок

Холодное формование листовых полимеров широко применяется в промышленности. При этом используются известные из опыта металлообрабатывающей промышленности преимущества данного способа переработки. Кроме того, применяется недорогой формующий инструмент. Однако указанным методом может быть переработано крайне ограниченное число полимеров. Так как стремление к восстановлению начальной формы тем больше, чем выше температура, то область применения отформованных таким образом изделий также ограничена. В изделиях заморожены большие внутренние напряжения. Этим способом нельзя получать тонкостенные изделия и изделия сложной конфигурации.

Термопласты можно перерабатывать методом холодного формования, если они обладают большой деформативностью и высоким модулем эластичности. На практике для холодного формования используют такие полимеры, как полиэтилен, полипропилен, ударопрочный полистирол, непластифицированный ПВХ и АБС-пластик. По сравнению с термоформованием холодное формование термопластов имеет следующие преимущества: 1) короткое время цикла, так как отпадает необходимость в нагреве и охлаждении (особенно это преимущество ощутимо при производстве толстостенных изделий); 2) небольшая энергоемкость; 3) возможность перерабатывать слоистые термопласты с различными температурами плавления слоев.

Холодное формование листовых термопластов протекает аналогично термоформованию. Однако в отличие от термоформования при холодном формовании имеет место значительная экономия перерабатываемого материала. Благодаря получению изделий равнотолщинных и повышенной прочности (вследствие сильной ориентации макромолекул) можно достичь экономии материала до 50%.

Так как в местах зажима и закругления неизбежно возникают цвета побежалости из-за вытяжки, то методом холодного формования целесообразно перерабатывать материалы светлых тонов.

Усилие вытяжки (формования) рассчитывается по формуле

$$F_{\text{в}} = \beta \delta \sigma_{\text{р}}$$

где β — коэффициент, зависящий от глубины вытяжки (рис. 7.21); u — периметр изделия; δ — толщина стенки заготовки; $\sigma_{\text{р}}$ — напряжение растяжения.

Приближенное значение усилия зажима F_3 определяется из соотношения

$$F_3 \approx 0,1 F_{\text{в}}$$

Значение F_3 зависит не только от $F_{\text{в}}$, но и от величины протяжки, типа смазки, радиуса закругления и т. д.

Для зазоров между штампом и проёмой порядка $(1 \div 1,2)\delta$,

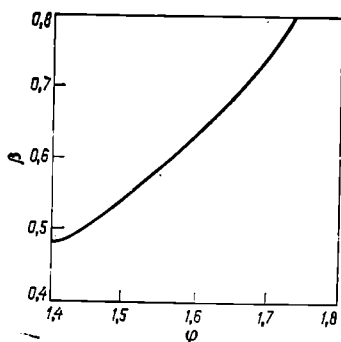


Рис. 7.21. Зависимость коэффициента β от коэффициента вытяжки ϕ .

для закругления переходных мест штампа и для проемы круглой формы можно рекомендовать следующие соотношения:

$$\delta < 1 \text{ мм} \quad r = 6 \div 8 \text{ мм}$$

$$\delta = 1 \div 3 \text{ мм} \quad r = 4 \div 6 \text{ мм}$$

$$\delta > 3 \text{ мм} \quad r = 2 \div 4 \text{ мм}$$

где r — радиус закругления в месте соединения стенки штампа с днищем.

Холодное формование только в особых случаях можно проводить при комнатной температуре. Обычно же его проводят при температурах, на $10\text{--}20^\circ$ ниже температуры размягчения полимера.

7.3.6. Объемная штамповка листовых термопластов

Штамповкой (рис. 7.22) изготавливают изделия из полипропилена, полиэтилена, АБС-пластика и полиформальдегида (включая и стеклонаполненные композиции). Время цикла при штамповке не зависит от толщины заготовки. На рис. 7.23 представлено сравнение времен циклов при изготовлении полипропиленовых изделий различной толщины методами штамповки и литья под давлением.

Удельное давление штамповки составляет $40\text{--}70$ МПа, причем с увеличением толщины стенок изделия удельное давление снижается.

Штамповка применяется для получения плит, труб и профилей. На рис. 7.24 представлена принципиальная схема получения полых изделий из полипропилена. Способ получения таких изделий апробирован при диаметре заготовки около 50 мм,

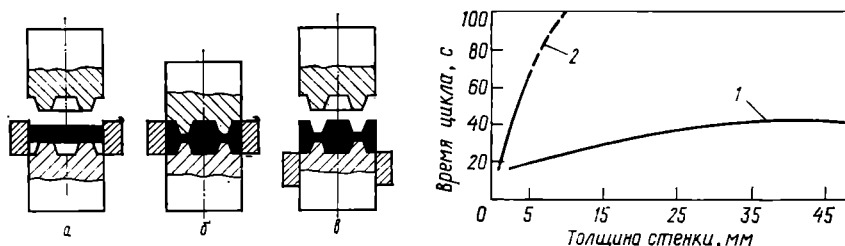


Рис. 7.22. Схема объемной штамповки:

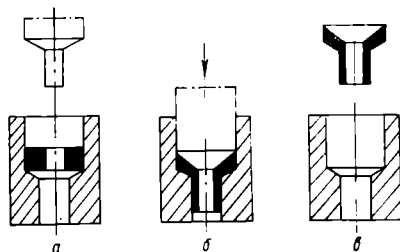
а — исходное положение; б — штамповка; в — раскрытие формы.

Рис. 7.23. Сравнение времен циклов при изготовлении полипропиленовых изделий различной толщины методами штамповки (1) и литья под давлением (2).

Рис. 7.24. Схема объемной штамповки полых изделий:

а — исходное положение; *б* — штамповка; *в* — сьем изделия.

глубине вытяжки 250 мм, температуре штамповки 423 К и удельном давлении 47—80 МПа.



7.3.7. Гидравлическое формование листовых термопластов

На рис. 7.25 представлен способ формования изделий из листовых термопластов с использованием водной прослойки (водяной подушки). При этом способе сохраняется постоянное количество воды, заключенной в резиновый мешок. При смыкании форм создается давление, которое равномерно передается на изделие.

Гидродинамический способ формования изделий из листовых термопластов показан на рис. 7.26. Этот способ подобен рассмотренному выше, только вместо резинового мешка используется резиновая пленка толщиной около 3 мм через ко-

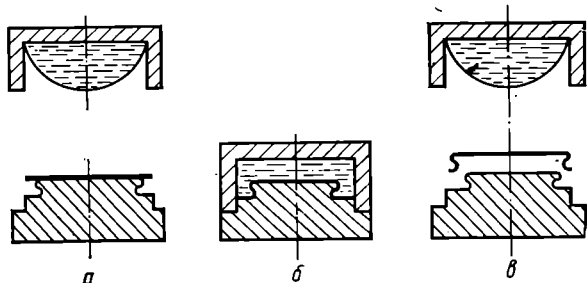


Рис. 7.25. Формование эластичной гидравлической подушкой:

а — укладка заготовки; *б* — формование; *в* — сьем изделия.

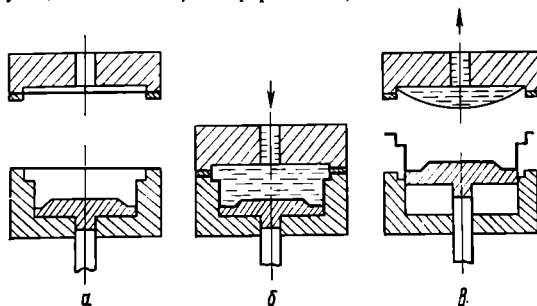


Рис. 7.26. Гидравлическое формование:

а — исходное положение; *б* — формование изделия; *в* — сьем изделия.

тору на заготовку передается давление формования (с помощью нагнетания воды или масла под давлением 0,7—3,5 МПа). При толщине стенки изделия 2,5—25 мм, времени цикла 20—40 с и скорости формования 450 мм/мин коэффициент формования $\varphi=2,7$.

7.4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ФОРМОВАНИЯ ЛИСТОВЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

При выборе конструкции машины для переработки листовых термопластов необходимо учитывать: 1) принцип переработки листовых материалов (три его стадии — нагрев, формообразование и фиксация полученной формы); 2) способ формования; 3) технико-экономическое обоснование способа формования.

Для осуществления механических способов переработки листовых полимерных материалов, ввиду их неширокого применения, специальные машины не разрабатывались, а было модернизировано металлообрабатывающее оборудование, прессы для пластмасс и т. п. При этом ограничивались только их дополнительным оснащением такими специальными приспособлениями, как нагреватели, зажимные рамы, проймы и т. д.

Для термоформования листовых термопластов вакуумным или пневматическим способами разрабатывались специальные машины и даже автоматизированные линии, предназначенные для упаковки различных продуктов. Известны универсальные машины для производства объемных изделий из листовых материалов, на которых можно изготавливать широкий ассортимент изделий различных размеров мелкими сериями. Они, как правило, оснащены одной или несколькими формами и пригодны для переработки различных типов термопластов. Эти машины чаще всего работают в автоматическом или полуавтоматическом режиме.

Основным параметром формовочных машин принято считать максимальный размер их зажимных устройств и наибольшую глубину формирования, а вырубных машин — максимальное усилие вырубки и наибольший размер вырубаемого изделия. Однако в связи с отсутствием научного обоснования оптимального ряда типоразмеров формирующих машин машиностроительные фирмы различных стран выпускают такого рода оборудование с произвольными характеристиками.

Классификация формирующего оборудования приведена на рис. 7.27 [204].

Метод формования определяет способ создания разности давлений, обеспечивающей формоизменение листового материала. Давление формования может создаваться за счет: разрежения в форме (вакуум-формование); создания над формируемой заготовкой избыточного давления с помощью сжатого воздуха (пневмоформование); жидкости, подаваемой под давлением (гидроформование), или паровоздушной смеси. В машинах для штампования изделий из пластмасс и при холодном

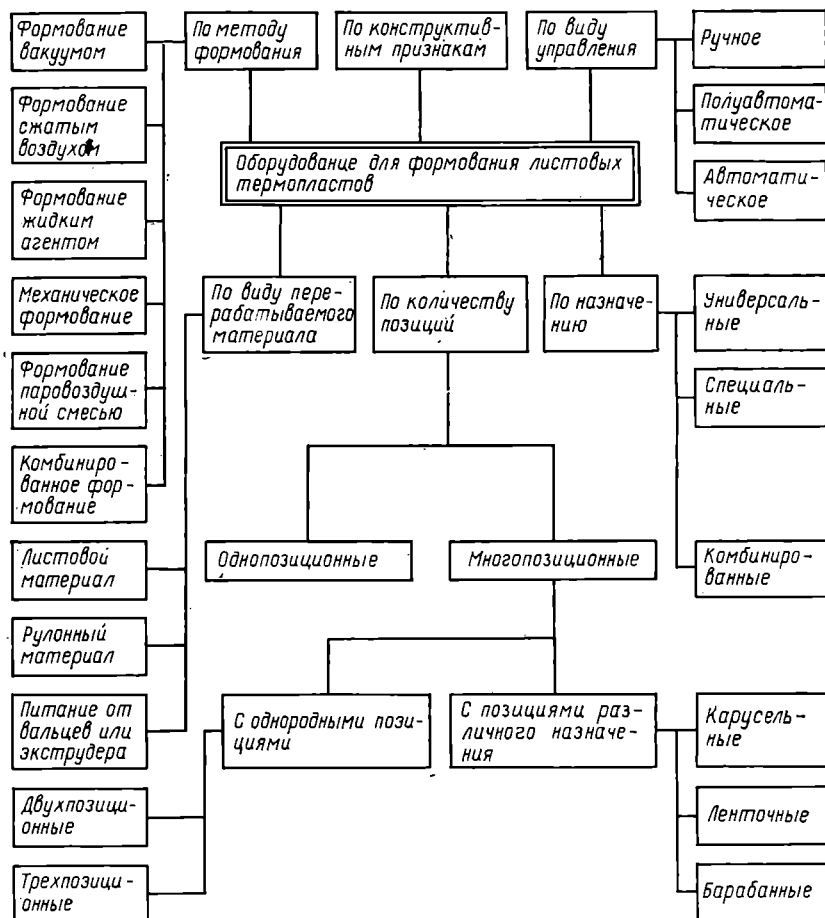


Рис. 7.27 Классификация оборудования для формования листовых и пленочных термопластов в высокоэластическом состоянии.

формовании используется механическое воздействие на термопласт. На многих машинах осуществляются комбинированные методы переработки (механо-пневматическое, пневмовакuumное формование и т. п.).

По виду управления машины для переработки листовых термопластов подразделяются на машины с ручным управлением, автоматы и полуавтоматы, причем машины с ручным управлением применяются лишь для производства изделий мелкими сериями.

По виду перерабатываемого материала все формовочное оборудование подразделяется на машины, работающие на штучных заготовках из листового или пленочного материала; машины, работающие на рулонном материале, и, наконец, машины,

питаемые листом или пленкой непосредственно с вальцов или экструдера, либо штучными заготовками с литьевой машины.

По назначению формовочные машины можно подразделить на универсальные, комбинированные и специализированные. Универсальные машины предназначены для изготовления широкого ассортимента изделия всевозможных габаритов малыми сериями. Они используются для работы с одно- и многогнездными формами и приспособлены для переработки различных термопластичных материалов. Специализированные машины предназначены для выпуска изделий узкой номенклатуры и для работы на определенном термопластичном материале. Они работают в автоматическом (реже полуавтоматическом) режиме. Комбинированные машины служат для выпуска изделий большими и средними сериями. Замена номенклатуры выпускаемых изделий возможна в достаточно широких пределах, однако требует существенной переналадки оборудования. Эти машины работают обычно в полуавтоматическом режиме и приспособлены для переработки широкого круга материалов.

Наиболее распространена классификация формующего оборудования по количеству позиций, на которых осуществляются те или иные технологические операции. По этому признаку все машины можно разделить на одно- и многопозиционные. Многопозиционные машины могут включать в себя однородные позиции или позиции разного назначения. На машинах с однородными позициями одни и те же технологические операции (например, операции оформления и охлаждения изделия) проходят одновременно на нескольких позициях (обычно на двух, максимум на трех). На многопозиционных машинах с позициями разного назначения на каждой из позиций проводят определенные, присущие только этой позиции технологические операции. Эти машины в зависимости от траектории движения перерабатываемого материала в свою очередь делятся на карусельные, ленточные и барабанные.

Технологический цикл характеризуется временем t_{τ} , в течение которого заготовка, находясь на формовочной машине, оформляется в готовое изделие [182]:

$$t_{\tau} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + nt_6 + t_7 \quad (7.1)$$

где t_1 — время загрузки и закрепления заготовки; t_2 — время нагрева; t_3 — время формования; t_4 — время охлаждения; t_5 — время механической обработки, если она производится на той же машине; t_6 — время перемещения материала с позиции на позицию в многопозиционных машинах; n — число перемещений материала с позиции на позицию в многопозиционных машинах; t_7 — время разгрузки.

В зависимости от принятого способа формования формула (7.1) может претерпевать изменения, однако ее структура остается постоянной.

Рабочий цикл (время между двумя последовательными выдачами единицы или порции продукции) зависит от конструк-

ции оборудования и определяется для однопозиционных формовочных машин как

$$t_p = t_t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_6 + t_7 \quad (7.2)$$

При работе на многопозиционных машинах отдельные операции технологического цикла группируют так, чтобы время их осуществления было примерно одинаковым.

Так, рабочий цикл трехпозиционной машины карусельного типа, например, равен

$$t_p = t_7 + t_1 + t_8 = t_2 + t_6 = t_3 + t_4 + t_6 \quad (7.3)$$

Интервал времени между последовательными повторениями энергозатрат машиной (энергетический цикл) зависит от того, работают ли нагреватели и двигатели периодически или непрерывно. Режим работы двигателя привода формующего плунжера зависит от конструкции привода, а режим работы двигателей вакуум-насоса и компрессора — от соответствия их производительности размерам ресивера, формующего инструмента и параметрам процесса.

Производительность формовочных машин зависит от продолжительности рабочего цикла оборудования и рассчитывается следующим образом:

а) по сырью

$$Q_1 = B \rho s_1 \delta_3 / t_p \quad (7.4)$$

где B — коэффициент использования оборудования по времени (в зависимости от организации производства на данном предприятии и надежности формующей машины колеблется от 0,75 до 0,92); ρ — плотность термопласта; s_1 — площадь заготовки; δ_3 — толщина заготовки;

б) по готовой продукции

$$Q_2 = B \rho (s_1 \delta_3 - s_2 \delta_{от}) / t_p \quad (7.5)$$

где s_2 — площадь отходов термопластов; $\delta_{от}$ — средняя толщина отходов.

7.5. РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ

В начале рассмотрим поля напряжений и деформаций, возникающие при формовании изделий из листовых термопластов по традиционной схеме. Для этого в качестве примера возьмем простейший негативный метод формования какого-либо осесимметричного изделия. Дело в том, что почти все существующие методы формования можно рассматривать как сочетание трех элементарных процессов: негативного, позитивного и свободного формования.

Рассмотрим формование изделия в виде полого усеченного конуса (рис. 7.28). На первом этапе происходит процесс свободного формования в круглой проеме; заготовка принимает форму тонкостенной оболочки в виде шарового сегмента с радиусом $R_0 = R / \sin \alpha$. Толщину стенки этой оболочки легко подсчитать, приравняв объем материала заготовки, находившегося

до начала формирования над полостью матрицы, к объему стенок сегментной оболочки с радиусом R_0 :

$$\delta_0 = \frac{1}{2} m \delta_3 \quad (7.6)$$

где $m = \sin^2 \alpha / (1 - \cos \alpha) = 1 + \cos \alpha$ — коэффициент, определяемый геометрическими параметрами формы.

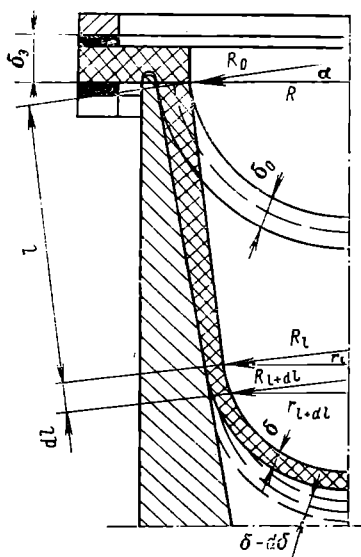
Практически же искомая толщина δ_0 будет несколько больше, так как разогретый материал частично утягивается в полость матрицы из пространства, ограниченного отверстием зажимного устройства, но не находящегося над полостью матрицы, а также из-под самого зажимного устройства. Поэтому выражение (7.6) следует уточнить, введя поправочный коэффициент:

$$\delta_0 = 1/2 k_y m \delta_3 \quad (7.7)$$

где k_y — коэффициент утяжки материала, определяемый экспериментально.

Коэффициент k_y зависит в основном от отношения объема части заготовки, ограниченной отверстием в зажимном устройстве (W_y), к объему части заготовки, находящейся непосредственно над матрицей (W_Φ). От температуры матрицы k_y не зависит. Температура заготовки сказывается на нем лишь в том случае, когда она высока настолько, что лист успевает прогреться под зажимным устройством. Однако это влияние незначительно, и в большинстве случаев можно им пренебречь. В качестве примера на рис. 7.29 приведена зависимость k_y от отношения W_y/W_Φ для ударопрочного полистирола.

На следующем этапе формирования «свободный» шаровой сегмент, втягиваясь внутрь формы, образует коническую часть с



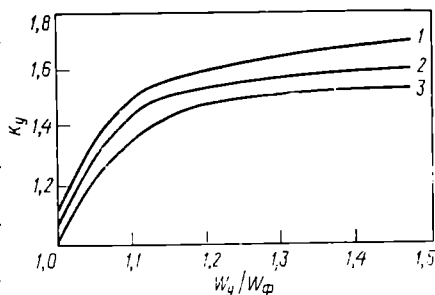
длиной образующей dl , соприкасающуюся с рабочей поверхностью матрицы, и сегментную оболочку с толщиной стенки $\delta_1 < \delta_0$. В дальнейшем эта оболочка также вытягивается, образуя новый конический участок и новую оболочку с толщиной стенки $\delta_2 < \delta_1$. Этот процесс повторяется до тех пор, пока последняя оболочка с толщиной стенки δ_i не соприкоснется с дном матрицы.

Предположим, что термопласт, который в процессе формирования соприкасается со стенкой изделия, образует на наружной поверхности

Рис. 7.28. Схема процесса негативного формирования изделия в виде полового усеченного конуса.

Рис. 7.29. Зависимость коэффициента k_y от отношения W_y/W_ϕ при температуре:

1 — 403 К; 2 — 418 К; 3 — 433 К.



твердую тонкую корку, температура которой ниже температуры стеклования, что допустимо, так как температура матрицы [209] обычно не превышает 323—343 К. Эта корка

препятствует дальнейшей вытяжке материала из элементарного конуса.

Рассмотрим процесс формования, когда вытяжка происходит на глубине, соответствующей длине образующей l . В этот момент формируемая заготовка состоит из двух фигур: усеченного конуса с образующей l и объемом стенки W_l^{yk} и шарового сегмента радиусом r_l и объемом стенки W_l^c . В следующее мгновение длина конической части увеличивается на dl , и объем ее стенки становится равным

$$W_{l+dl}^{yk} = W_l^{yk} + dW^{yk} \quad (7.8)$$

Сегментная же часть утончится на величину $d\delta$, а объем ее стенки станет равным

$$W_{l+dl}^c = W_l^c + dW^c \quad (7.9)$$

Так как объем формируемого материала остается в течение всего процесса постоянным, то из (7.8) и (7.9) следует, что $-dW^{yk} = dW^c$. При этом величина dW^c может быть рассчитана по формуле

$$dW^c = 2\pi \frac{1}{m} r_l (2\delta \cos \alpha dl + r_l d\delta) \quad (7.10)$$

В зависимости от температуры формы образование поверхностной корки на конической части изделия может полностью прекращать вытяжку части материала, соприкоснувшейся со стенкой, или только уменьшать ее.

Кроме того, можно предположить, что процесс теплообмена идет не только в стенке, но и на периферии, захватывая при этом какую-то часть материала, находящуюся еще в сегментной оболочке. Поэтому при расчете dW^{yk} вводим коэффициент k_0 , характеризующий степень охлаждения формируемого материала при контакте с рабочей поверхностью формирующего инструмента:

$$dW^{yk} = 2k_0 \pi r_l dl \quad (7.11)$$

При этом возможны три случая: 1) $k_0 < 1$; это означает, что часть материала уносится с конического участка; 2) $k_0 = 1$; материал, соприкоснувшись с матрицей, больше не вытягивает-

ся; 3) $k_0 > 1$; охлаждается некоторое количество материала, находящегося в шаровом сегменте.

Приравняв уравнения (7.10) и (7.11), получим:

$$-\frac{d\delta}{\delta} = (mk_0 - 2 \cos \alpha) \frac{dl}{R - l \cos \alpha} \quad (7.12)$$

Так как в период формования длина образующей меняется от 0 до l , а толщина сегментной оболочки от δ_0 до δ , то, проинтегрировав выражение (7.12) в этих пределах, выразим в явном виде текущее значение толщины δ :

$$\delta = \delta_0 \left(1 - \frac{l}{R} \cos \alpha\right)^{-2+k_0 f} \quad (7.13)$$

С учетом выражения (7.7) получим:

$$\delta = \frac{1}{2} m k_y \delta_3 \left(1 - \frac{l}{R} \cos \alpha\right)^{-2+k_0 f} \quad f = \frac{\sin^2 \alpha}{(1 - \cos \alpha) \cos \alpha} \quad (7.14)$$

Пользуясь полученными уравнениями, можно легко перейти к выражению для расчета толщины изделия в виде полого цилиндра [209]:

$$\delta = \frac{1}{2} k_y \delta_3 \exp \left(- \frac{k_0 h}{R} \right) \quad (7.15)$$

где h — координата по высоте цилиндрического изделия, а R — его радиус.

Исходя из тех же предпосылок, могут быть выведены уравнения, описывающие процесс формования изделий другой конфигурации. Так, для неосесимметричного изделия, имеющего вид полого эллиптического цилиндра, соответствующее уравнение имеет вид:

$$\delta = k_y \delta_3 \left(\frac{b}{a} + \frac{\arcsin \varepsilon}{\varepsilon} \right)^{-1} \exp \left[- \frac{4 h k_0 E(\pi/2, \varepsilon)}{\pi b \left(\frac{b}{a} + \frac{\arcsin \varepsilon}{\varepsilon} \right)} \right] \quad (7.16)$$

где a и b — соответственно большая и малая полуоси эллипса, лежащего в основании цилиндра; $\varepsilon = \sqrt{a^2 - b^2}/a$ — эксцентриситет эллипса; $E(\pi/2, \varepsilon)$ — полный эллиптический интеграл.

Формула (7.16) может быть представлена в упрощенном виде:

$$\delta = \frac{k_y \delta_3 a}{\sqrt{2(a^2 + b^2)}} \exp \left(- \frac{h k_0}{b} \right) \quad (7.17)$$

Расхождение результатов, вычисленных по формулам (7.16) и (7.17), составляет 6—8%.

Для изделия, имеющего вид полого прямоугольного параллелепипеда, в основании которого лежит прямоугольник со сторонами a и b ($a \leq b$), уравнение записывается следующим образом:

$$\delta = \delta_3 k_y \frac{ab}{F} \exp \left[- \frac{2 k_0 (a + b) h}{F} \right] \quad (7.18)$$

где h — как и в предыдущих случаях, координата по высоте, а

$$F = 2ab - b^2 \frac{a^2}{b^2 - a^2} \ln \left(1 + \sqrt{1 - \frac{a^2}{b^2}} \right)$$

Аналогичный подход может быть использован и при описании других методов формования. Так, принцип рассмотрения свободного формования в проймах заложен в самом подходе к описанию негативного формования. Достаточно вспомнить предпосылки для получения уравнений (7.6) и (7.7). Тот же подход действителен и при описании позитивного формования, а также комбинированных методов.

В качестве примера [207] можно привести уравнение, описывающее процесс формования изделий типа «цилиндр в цилиндре» позитивно-негативным методом:

$$\delta = \frac{2}{\pi} k_y' k_y'' \delta_3 \exp \left(- \frac{h}{\pi m_1} \right) \quad (7.19)$$

где k_y' и k_y'' — коэффициенты утяжки, характеризующие утяжку материала соответственно из-под зажимного устройства и с пуансона; $m_1 = \frac{R^2 - r^2}{4(k_o'' R + k_o' r)}$ (здесь R — радиус большего цилиндра; r — радиус меньшего цилиндра; k_o' , k_o'' — коэффициенты, характеризующие охлаждение термопласта на рабочих поверхностях матрицы и пуансона).

Уравнения (7.7) и (7.14) — (7.19), как было видно из самого подхода к задаче, справедливы лишь при формовании глубоких изделий, т. е. изделий, в которых сначала оформляется боковая стенка.

Для неглубоких изделий, в которых в первую очередь происходит оформление днища, подход принципиально не изменяется. Однако в этом случае при описании процесса учитывается, что вначале при негативном формовании, как и в случае формования глубоких изделий, происходит стадия свободного формования, за ней следует стадия оформления центральной части днища и завершает процесс стадия оформления боковых стенок изделия и периферийных участков днища. Так, процесс формования полого цилиндрического изделия негативным методом при $R \geq H$ можно описать уравнением [200]

$$\delta = \delta_2 (1 - A)^{0,274} \left[\frac{\pi - 1,14\bar{H}}{\pi - 1,14\bar{H}(1 - A)} \right]^{0,62} \quad (7.20)$$

где $\delta_2 = \delta_0 \exp \left[- \int_0^a f(a, H) da \right]$ при $a = R - \bar{H}$; H — полная высота изделия; a — координата по радиусу изделия; $A = (a - R + H)/H$ (при расчете толщины днища) или $A = h/H$ (при расчете толщины боковой стенки); h — текущая координата по высоте изделия; $\bar{H} = H/R$.

Исходя из предложенного выше описания процесса формования, негативное формование осесимметричных изделий можно представить как бесконечную сумму процессов свободного фор-

мования в круглой форме [205]. При этом толщина формуемой полусферы (для цилиндрического изделия) или шарового сегмента (для изделия в виде усеченного конуса) будет изменяться по определенному закону [$\delta = \delta(h)$ или $\delta = \delta(l)$].

Известно, что напряжения в осесимметричной безмоментной оболочке определяются по уравнениям Лапласа независимо от механических свойств материала оболочки:

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{p}{\delta(h)} \quad (7.21)$$

где p — давление формования; σ_1 и σ_2 — нормальные напряжения в меридиональном и экваториальном направлениях; R_1 и R_2 — радиусы кривизны меридиональной и экваториальной кривых.

Здесь мы пренебрегаем инерционными силами в связи с малой массой оболочки и малыми (0,05—0,2 м/с) скоростями формоизменения, а также касательными напряжениями и напряжением в радиальном направлении.

Согласно принятой теории, оболочка формуется только за счет свободной сферической части. Экваториальные напряжения, действующие в какой-либо элементарной площадке, способствуют формованию изделия лишь до тех пор, пока данная площадка не соприкоснется с матрицей. В этот момент деформация прекращается, а формующее давление воспринимается стенками матрицы. Меридиональные напряжения также прекращают свое деформативное воздействие на площадку, как только она соприкоснется со стенкой матрицы. Доказательством этого является тот факт, что значение коэффициента, характеризующего степень охлаждения (k_0), как правило, близко к единице.

Так как для полусферы и шарового сегмента $R_1 = R_2 = R$, то по симметрии $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$, и формула (7.21) принимает вид

$$\sigma(h) = \frac{pR}{2\delta(h)} \quad (7.22)$$

Подставив из уравнения (7.15) функцию $\delta = \delta(h)$, для цилиндрического изделия получим:

$$\sigma(h) = \frac{pR \exp(k_0 h/R)}{k_y \delta_3} \quad (7.23)$$

Для конического изделия, в соответствии с уравнением (7.14)

$$\sigma_l = \frac{pr_l}{mk_y \delta_3 \left(1 - \frac{l}{R} \cos \alpha\right)^{-2+k_0 f}} \quad (7.24)$$

где r_l — радиус шарового сегмента на высоте образующей l .

Предположим, что механические свойства формуемого термопласта с достаточной точностью описываются уравнением наследственной среды:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \int_0^t k(t-\theta) \sigma(\theta) d\theta \quad (7.25)$$

где t — время, прошедшее от начала формирования до момента соприкосновения заготовки с матрицей в точке с текущей координатой h ; ε — относительная деформация термопласта под действием напряжения σ ; E — модуль упругости.

Подынтегральная функция, выражающая влияние нагружения в момент времени θ , определяется графо-аналитическим методом по кривым прямого последействия для термопласта при температурах и напряжениях, соответствующих процессу формирования того или иного изделия.

Согласно обобщенному закону Гука, запишем:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1(t)}{E} + \int_0^t k(t-\theta) \sigma_1(\theta) d\theta - \mu \frac{\sigma_2(t)}{E} - \mu \int_0^t k(t-\theta) \sigma_2(\theta) d\theta \quad (7.26)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2(t)}{E} + \int_0^t k(t-\theta) \sigma_2(\theta) d\theta - \mu \frac{\sigma_1(t)}{E} - \mu \int_0^t k(t-\theta) \sigma_1(\theta) d\theta$$

$$\varepsilon_3 = -\mu \left[\frac{\sigma_1(t)}{E} + \int_0^t k(t-\theta) \sigma_1(\theta) d\theta + \frac{\sigma_2(t)}{E} + \int_0^t k(t-\theta) \sigma_2(\theta) d\theta \right]$$

где μ — коэффициент Пуассона.

Из уравнения (7.26) видно, что при равенстве меридиональных и экваториальных напряжений соблюдается равенство деформаций в тех же направлениях. Это явление легко наблюдать на готовых изделиях с помощью метода «накатанных сеток».

Деформацию в радиальном направлении можно определить: для цилиндрического изделия — с помощью уравнения (7.15), подставив в него $h = v_{cp} t$ (где v_{cp} — средняя скорость формоизменения)

$$\varepsilon_3(t_h) = \frac{1}{2} k_y \exp \left(-\frac{k_o v_{cp}' h}{k} \right) - 1 \quad (7.27)$$

для конического изделия — с помощью уравнения (7.14), подставив в него $l = v_{cp} t$

$$\varepsilon_3(t_l) = \frac{1}{2} m k_y \left(1 - \frac{v_{cp}' l}{R} \right)^{-2+k_o f} - 1 \quad (7.28)$$

Деформация в меридиональном и экваториальном направлениях определяется из уравнения (7.26):

$$\frac{\sigma t}{E} + \int_0^t k(t - \theta) \sigma(\theta) d(\theta) = \frac{\varepsilon_3(t)}{2\mu} \quad (7.29)$$

$$\varepsilon_1(t) = \varepsilon_2(t) = (1 - \mu) \frac{-\varepsilon_3(t)}{2\mu} \quad (7.30)$$

Иной подход [199, 201] к анализу напряженно-деформированного состояния термопластичной заготовки при формировании осесимметричных изделий дают методы численного интегрирования систем дифференциальных уравнений безмоментной теории оболочек, позволяющие воспользоваться механическими моделями полимерных материалов, отражающими наиболее важные особенности их деформативных свойств при вытяжке в процессе формования. Примером такого подхода может служить математическая модель позитивного пневмо- или вакуумформования с операцией механической вытяжки на цилиндрическом пуансоне:

$$\frac{d(\sigma_1 \delta)}{dr} = (\sigma_2 - \sigma_1) \frac{\delta}{r} \quad (7.31)$$

$$r \left(\sigma_1 \delta \frac{d\alpha}{dr} \sin \alpha - p \right) = \delta \sigma_r \cos \alpha \quad (7.32)$$

$$2\sigma_1 - \sigma_2 = 6\psi J^{m'-1} \dot{\varepsilon}_1 \quad (7.33)$$

$$2\sigma_2 - \sigma_1 = 6\psi J^{m'-1} \dot{\varepsilon}_2 \quad (7.34)$$

$$r \frac{d\dot{\varepsilon}_3}{dr} = \dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2 + \left(\frac{dv_3}{dr} + v_1 \frac{d\alpha}{dr} \right) \operatorname{ctg} \alpha \quad (7.35)$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{1}{r} (v_1 \cos \alpha + v_3 \cos \alpha) \quad (7.36)$$

$$\dot{\varepsilon}_3 = -(\dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2) \quad (7.37)$$

где δ — текущая толщина оболочки; r — радиальная координата материальной точки в оболочке вращения; α — угол между касательной к меридиональному направлению и осью симметрии оболочки; σ_1 и σ_2 — нормальные напряжения, действующие в оболочке в меридиональном и экваториальном направлениях; $\dot{\varepsilon}_1$, $\dot{\varepsilon}_2$ и $\dot{\varepsilon}_3$ — скорости логарифмических деформаций в трех взаимноперпендикулярных направлениях, причем $\dot{\varepsilon}_3$ характеризует скорость утонения оболочки; p — давление формования; Ψ — коэффициент сопротивления материала, зависящий от температуры и степени предварительной вытяжки; $J = 2 \sqrt{\dot{\varepsilon}_1^2 + \dot{\varepsilon}_2^2 + \dot{\varepsilon}_3^2}$ — интенсивность скоростей деформации; v_1 и v_3 — составляющие скорости перемещения материальных точек оболочки соответственно в меридиональном направлении и в направлении нормали к поверхности оболочки; m' — показатель степени в уравнении $\sigma = f(\varepsilon)$.

При жестком закреплении края заготовки в прижимном устройстве справедливы следующие граничные условия:

$$v_1 \cos \alpha - v_3 \sin \alpha = v_n \quad \text{при} \quad r = r_3$$

$$\dot{\epsilon}_3 = 0 \quad \text{при} \quad r = r_3$$

$$\dot{\epsilon}_1 = \dot{\epsilon}_2 \quad \text{при} \quad r = r_{\text{ц}}$$

где v_n — скорость относительного перемещения прижимного устройства и пуансона; r_3 — радиус заготовки по краю прижимного устройства; $r_{\text{ц}}$ — радиус центрального участка оболочки с однородной деформацией.

Численное интегрирование рассматриваемой системы возможно осуществить лишь при использовании последовательных приближений для граничных условий и при решении трансцендентных алгебраических уравнений, входящих в систему.

Несколько иная физическая картина возникает при холодном формовании. Для пояснения рассмотрим, как и в предыдущем случае, формование простейшего осесимметричного изделия — цилиндрического стакана (рис. 7.30), так как основные закономерности, полученные в результате анализа процесса термоформования этого изделия могут быть распространены на более сложные случаи холодного формования.

Положим, что зазор между пуансоном и матрицей позволяет материалу свободно перемещаться в вертикальном направлении, не испытывая бокового давления. Это условие характеризует процесс формования без заданного утонения материала. При формовании фланцевая часть заготовки и часть заготовки, находящаяся на плоском торце пуансона и на его скругленной кромке, претерпевают пластическую деформацию. А часть заготовки, находящаяся на стенках стакана, испытывает упруго-пластические деформации, причем упругая составляющая в этом месте значительно больше пластической.

Под действием пуансона средняя часть заготовки вдавливается в отверстие матрицы. Вследствие сплошности заготовки перемещение средней части вызывает появление во фланцевой части растягивающих нормальных напряжений σ_r , действующих в радиальном направлении, и сжимающих напряжений σ_t , действующих в тангенциальном направлении. При корректном рассмотрении задачи следует учитывать также напряжение σ_z , возникающее в осевом направлении вследствие давления на заготовку прижимного устройства. Однако напряжение σ_z час-

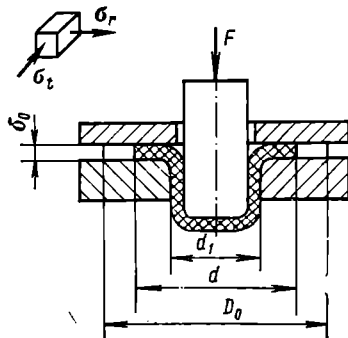


Рис. 7.30. Схема процесса холодного формования цилиндрического изделия.

то принимают близким или равным нулю, а напряжения во фланцевой части рассчитывают по схеме, принятой для расчета круглой пластины с круглым отверстием, по контуру которого приложена равномерно распределенная нагрузка. Донную часть заготовки можно рассматривать как круглую пластину, нагруженную радиальной растягивающей распределенной нагрузкой. В вертикальных стенках образующегося стакана напряженное состояние близко к линейному растяжению.

Наиболее нагруженными частями заготовки (с напряжением $\sigma_{r \max}$) являются переходы от фланцевой и донной частей к вертикальным стенкам. Поэтому для успешного формования должно соблюдаться условие $\sigma_{r \max} < [\sigma_T]$, где $[\sigma_T]$ — предел текучести.

Формоизменение заготовки в реальных условиях неизбежно сопровождается потерями на преодоление сил трения: на поверхности соприкосновения термопласта с прижимным устройством при перемещении термопласта по закругленной входной кромке матрицы [208].

Результирующее удельное давление q_1 определяется сопротивлением полимера деформированию, глубиной вытяжки, силами трения и сопротивлением изгибу:

$$q_1 = [(\sigma_r + \sigma_{тр}) \exp(f\alpha) + \sigma_{из}] \sin \alpha \quad (7.38)$$

где $\sigma_{тр}$ — удельное сопротивление трения от силы прижима заготовки; $\sigma_{из}$ — удельное сопротивление изгибу па входной кромке матрицы; $\exp(f\alpha)$ — множитель, характеризующий сопротивление силам трения на входной кромке матрицы; α — угол охвата материалом кромки матрицы; f — коэффициент трения заготовки по металлу.

В момент вытяжки, когда усилие достигает максимального значения, $\alpha = 90^\circ$. Разлагая функцию $\exp(f\alpha)$ в ряд и пренебрегая членами высшего порядка, можно без большой погрешности принять, что для этого момента

$$\exp(f\alpha) = \exp(f\pi/2) \approx 1 + (f\pi/2) \approx 1 + 1,6f \quad (7.39)$$

Следовательно, в момент, отвечающий максимальному усилию

$$q_1 = (\sigma_r + \sigma_{тр})(1 + 1,6f) + \sigma_{из} \quad (7.40)$$

В этой формуле

$$\sigma_r = [\sigma_B] \Phi_1 \left(\frac{1}{k_1} - \Phi_1' \right); \quad \sigma_{тр} = \frac{fq_{п'}(1 - k_1^2)}{2k_1} \frac{D_0}{\delta_0};$$

$$\sigma_{из} = \frac{[\sigma_B]}{2r_M/\delta_0 + 1}$$

где $[\sigma_B]$ — предел прочности термопласта; $q_{п'} = [\sigma_B] \Phi_1 \left(\frac{1}{k_1} - \Phi_1' \right) \Phi_1'' \frac{D_0}{100\delta_0}$ — удельное усилие прижима заготовки; $\Phi_1, \Phi_1', \Phi_1''$ — константы деформируемого материала; $k_1 = d_1/D_0$ — коэффициент вытяжки; r_M — радиус скругления; D_0 — начальный диаметр заготовки (см. рис. 7.30).

Тепловые расчеты процесса формирования листовых термопластов в настоящее время еще полностью не разработаны. Дело в том, что периодически приводимые в литературе способы такого расчета не учитывают вовсе или учитывают лишь в самых общих чертах конвективный теплообмен, играющий немалую роль в процессе нагрева листовой заготовки. Принимается во внимание лишь лучистый теплообмен. Это объясняется тем, что нагреватели большинства формующих машин представляют собой плоские источники лучистой тепловой энергии, располагающиеся на некотором расстоянии от нагреваемой заготовки, причем пространство между нагревателем и заготовкой не изолировано от окружающей среды. Это ведет к тому, что естественная конвекция в пространстве между нагревателем и заготовкой постоянно нарушается всевозможными возмущениями, причиной которых являются случайные воздушные потоки в окружающем машину пространстве. Не учитываются большинством расчетов и краевые потери тепла.

Наиболее проверенной можно считать методику расчета, изложенную Бернхардтом [86]. Интенсивность теплового потока от плоского нагревателя к заготовке, пропускная способность которой равна нулю, определяется как

$$q = \bar{\sigma} M (T_1^4 - T_2^4) \quad (7.41)$$

где $\bar{\sigma}$ — постоянная Стефана — Больцмана; $M = \frac{\xi_1 \xi_2}{\xi_1 - \xi_1 \xi_2 + \xi_2}$ — коэффициент лучеиспускания, выражаемый через степень черноты нагревающей и нагреваемой, поверхностей; T_1 и T_2 — температуры нагревающей и нагреваемой поверхностей соответственно.

Для мощных нагревателей, когда можно пренебречь влиянием тепла, излучаемого поверхностью заготовки, уравнение (7.41) приобретает вид

$$q_n = \sigma M T_1^4$$

Для варианта одностороннего нагрева заготовки температура на обогреваемой поверхности определяется по формуле

$$T_{\max} = T_0 + \frac{q\delta}{\lambda} \left[\frac{at}{\delta^2} + \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left(-\pi^2 n^2 \frac{at}{\delta^2} \right) \right] \quad (7.42)$$

а на необогреваемой

$$T_{\min} = T_0 + \frac{q\delta}{\lambda} \left[\frac{at}{\delta^2} - \frac{1}{6} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp \left(-\pi^2 n^2 \frac{at}{\delta^2} \right) \right] \quad (7.43)$$

где T_0 — начальная температура заготовки; δ — толщина листа; λ — коэффициент теплопроводности термопласта; a — коэффициент температуропроводности термопласта; t — время.

Для варианта двухстороннего обогрева $T_{\max}$ рассчитывается для наружных поверхностей заготовки, а $T_{\min}$ — для срединной

поверхности, причем в уравнениях (7.42) и (7.43) вместо величины δ вводится $\delta/2$.

В качестве критерия равномерности распределения температуры используется

$$I_n = \frac{T_{\max} - T_0}{T_{\min} - T_0} \quad (7.44)$$

Сравнивая уравнение (7.44) с (7.42) и (7.43), можно переписать (7.44) в следующем виде:

$$I_n = f(at/\delta^2)$$

На рис. 7.31 эта функция представлена графически [86].

Время охлаждения изделий может быть с достаточной точностью рассчитано по уравнению

$$t_{\text{охл}} = \frac{(\delta_{\max}/2)^2}{\pi^2 a} \ln \left(\frac{4}{\pi} \frac{T_4 - T}{T_3 - T} \right) \quad (7.45)$$

где $\delta_{\max}$ — максимальная толщина изделия; T_4 — температура, до которой должна быть охлаждена срединная поверхность стенок изделия; T_3 — температура термопласта в момент формования изделия; T — температура окружающего воздуха или рабочей поверхности оформляющего инструмента (в уравнение подставляется наибольшая из них).

Иной подход, допускающий рассмотрение комплексного применения средств нагрева, основан на использовании уравнений для преобразования профиля температур в слое полимерного материала при одномерном (поперечном) тепловом потоке за малое время Δt . Общий численный метод решения такой задачи дан в работах [198, 201].

Одним из необходимых компонентов расчета формующего оборудования является расчет работы и мощности, затрачиваемой при формовании изделий. Для вакуум-формования такой расчет может быть произведен [203], исходя из анализа работы вакуумной системы машин. Рассмотрим вакуумную систему, состоящую из насоса, ресивера и матрицы для негативного формования. Пусть p_0 — остаточное давление в ресивере; p_1 — давление в форме до начала вакуум-формования, равное атмосферному; p_2 — давление в ресивере в конце формования; w_m — объем матрицы; w_p — объем ресивера. Расчет проводится при допущении, что в процессе формования вакуум-насос отключается от системы, или, что то же, производительность насоса $Q_n \ll \ll w_\phi/t_\phi$ (t_ϕ — время формования). Исходя из равенства количества воздуха, заключенного под

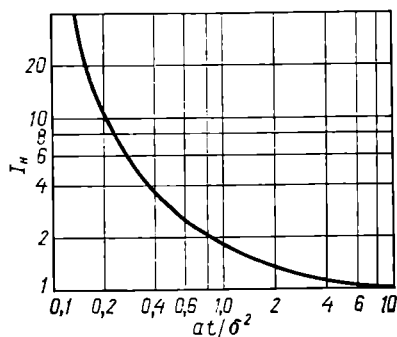


Рис. 7.31. Зависимость функции I_n от at/δ^2 .

заготовкой в матрице и в ресивере в начальный и конечный моменты формования, запишем:

$$p_1 w_m + p_0 w_p = p_2 w_p \quad (7.46)$$

Аналогично, для момента времени, когда формуемая заготовка займет промежуточное положение и из матрицы будет вытеснен объем w_i , можно составить равенство:

$$p_i (w_m - w_i) + p_i w_p = p_2 w_p \quad (7.47)$$

Из уравнений (7.46) и (7.47) получим текущее значение давления в матрице:

$$p_i = \frac{[p_1 + p_0 (w_p/w_m)] w_m}{w_m (1 + w_p/w_m) - w_i} \quad (7.48)$$

Деформирование заготовки происходит под действием разности давлений:

$$p_i^{\Phi} = p_1 - p_i = \frac{w_p (p_1 - p_0) - w_i p_i}{w_m (1 + w_p/w_m) - w_i} \quad (7.49)$$

Теоретическая работа, затрачиваемая на формования изделия, равна сумме произведений мгновенных значений давления формования (p_i^{Φ}) на объем воздуха, вытесняемого из матрицы:

$$U = \int_0^w p_i^{\Phi} dw = \int_0^w \frac{w_p (p_1 - p_0) - w_i p_i}{w_m (1 + w_p/w_m) - w_i} dw$$

или

$$U = w_m \left[p_1 - \left(p_1 - \frac{w_p}{w_m} p_0 \right) \ln \left(\frac{w_p}{w_m} + 1 \right) \right] \quad (7.50)$$

Приведенный метод расчета не является универсальным, так как не дает возможности определить работу, затрачиваемую при других методах формования, и не позволяет учитывать физико-механические особенности формуемого термопласта.

Для материалов с вязкоупругими свойствами удельную работу при формовании можно определить [206], исходя из напряженно-деформированного состояния формуемого термопласта:

$$U_{\text{уд}} = \int_0^{\bar{\epsilon}_{1\text{к}}} \sigma_1 d\bar{\epsilon}_1 + \int_0^{\bar{\epsilon}_{2\text{к}}} \sigma_2 d\bar{\epsilon}_2 + \int_0^{\bar{\epsilon}_{3\text{к}}} \sigma_3 d\bar{\epsilon}_3 \quad (7.51)$$

где $\bar{\epsilon}_1, \bar{\epsilon}_2, \bar{\epsilon}_3$ — логарифмическая деформация материала формуемой заготовки соответственно в меридиональном, экваториальном и радикальном направлениях; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — напряжения в формуемом изделии соответственно в тех же направлениях; $\epsilon_{\text{к}}$ — конечная логарифмическая деформация, получаемая в процессе формования.

В качестве примера определим работу, затрачиваемую на формование изделия в виде цилиндрического стакана негатив-

ным методом. Так как, согласно уравнениям (7.22) и (7.30), при формировании осесимметричных изделий негативным методом $\sigma_1 = \sigma_2$, $\sigma_3 = 0$ и $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, то уравнение (7.51) примет вид

$$U_{yd} = \int_0^{\bar{\varepsilon}_k} 2\sigma d\bar{\varepsilon}$$

С учетом формулы (7.23) и того, что

$$\bar{\varepsilon}_k = \ln \left\{ 1 + \left[\frac{\exp(k_0 H/R)}{0,5k_y} - 1 \right] \frac{1-\mu}{2\mu k_0} \right\}$$

(где H — полная высота стакана, а μ — коэффициент Пуассона), после интегрирования получим:

$$U_{yd}^{ст} = \frac{2pR}{k_y \delta_3} \exp\left(\frac{k_0 h}{R}\right) \ln \left\{ 1 + \left[\frac{\exp(k_0 H/R)}{0,5k_y} - 1 \right] \frac{1-\mu}{2\mu k_0} \right\} \quad (7.52)$$

Полная работа $U^{ст}$, идущая на оформление стенок, определится из уравнения

$$\int_0^{U^{ст}} dU^{ст} = \int_0^{\omega^{ст}} U_{yd}^{ст} d\omega^{ст} \quad (7.53)$$

где $d\omega^{ст} = 2\pi\delta(h)dh$ — элементарное изменение объема стенок изделия; функция $\delta(h)$ определяется с помощью формулы (7.15).

После подстановки соответствующих выражений в уравнение (7.53) получаем полную работу, затраченную на оформление стенок изделия:

$$U^{ст} = 2\pi p R^2 H \ln \left\{ 1 + \left[\frac{\exp(k_0 H/R)}{0,5k_y} - 1 \right] \frac{1-\mu}{2\mu k_0} \right\} \quad (7.54)$$

Аналогичным образом находим полную работу, идущую на оформление днища цилиндрического стакана. Полная работа, затраченная на формирование всего изделия, вычисляется как сумма работ, затраченных на формирование стенок и днища изделия:

$$U = \pi p R^2 (2H + R) \ln \left\{ 1 + \left[\frac{\exp(k_0 H/R)}{0,5k_y} - 1 \right] \frac{1-\mu}{2\mu k_0} \right\} \quad (7.55)$$

Зная работу, продолжительность рабочего цикла и величину потерь (коэффициент полезного действия оборудования), легко рассчитать мощность привода формирующего оборудования.

При расчете зажимных устройств формовочных машин усилие прижима листа F определяется в зависимости от того, с проскальзыванием или без проскальзывания заготовки в прижимном устройстве ведется процесс. Однако в обоих случаях удельное давление прижима листа p_{np} должно быть меньше предела текучести термопласта при сжатии в условиях температуры формования.

Таблица 7.3. Удельные давления прижима при вырубке отверстий

Термопласт	Удельное давление (МПа) при толщине заготовки		
	до 1 мм	1—2 мм	2—5 мм
Полиметилметакрилат	8—10	12—18	18—30
Целлулоид	1,5—2	2—2,5	—
Полиэтилен	0,5—1	1—1,2	1,2—1,5
Поливинилхлорид	2—3	3—4	4—6

Если процесс проводится без проскальзывания заготовки в зажимом устройстве, то

$$F \geq \sigma \delta_3 L / f \quad (7.56)$$

где L — длина контура прижима листа; f — коэффициент трения; δ_3 — толщина заготовки; σ — напряжения, возникающие в заготовке на первой стадии формования.

Несмотря на то, что при последующих стадиях формования в заготовке могут возникать напряжения, большие σ , усилие от этих напряжений не воспринимается полностью зажимным устройством: значительная часть усилия «гасится» формующим инструментом.

Если же формование ведется с проскальзыванием заготовки, то

$$F < \sigma \delta_3 L / f \quad (7.57)$$

В вырубных машинах удельное давление прижима обрабатываемого материала зависит от толщины заготовки, сложности контура вырубки, температуры заготовки и вырубного инструмента. Удельные давления прижима при вырубке при комнатной температуре приведены в табл. 7.3.

Технологическое усилие вырубных устройств F_B рассчитывается из соотношения

$$F_B \geq [\tau_{ср}] L_B \delta_3 \quad (7.58)$$

где $[\tau_{ср}]$ — предел прочности на срез обрабатываемого термопласта; L_B — периметр вырубаемого изделия.

Значительная доля всего формующего оборудования работает в настоящее время по принципу вакуум- или пневмоформования. Расчет пневмо- и вакуум-систем такого оборудования ведется в соответствии с общепринятыми для подобных систем нормами. В данном случае интерес представляет лишь определение производительности вакуум-насоса и компрессора.

Принято считать [203], что при вакуум-формовании рациональное соотношение объемов ресивера ω_p и форм ω_m лежит в пределах $\omega_p/\omega_m = 6 \div 8$. При этом производительность вакуум-насоса должна быть такой, чтобы обеспечить за время между окончанием оформления очередного изделия и началом оформления следующего остаточное давление в ресивере p_0 .

При расчете производительности компрессоров пневмосистем полный расход сжатого воздуха на один рабочий цикл формирования определяется как

$$w = w_1 + w_2 + w_3 \quad (7.59)$$

где w_1 — объем сжатого воздуха, расходуемого на пневмопривод подвижных частей; w_2 — объем сжатого воздуха, идущего непосредственно на формирование изделия; w_3 — объем сжатого воздуха, расходуемый на отрыв изделия от формы при сьеме изделия.

ГЛАВА 8

Нанесение покрытий, тиснение и каландрование

8.1. НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА ГИБКУЮ ОСНОВУ

Покрытия на гибкие материалы наносятся почти всегда на стационарных агрегатах, которые работают с высокой производительностью и степенью автоматизации. Высокая эффективность работы указанных агрегатов обеспечивается непрерывностью процесса.

Текстильные ткани с полимерными покрытиями применяются в качестве искусственных кож, а также облицовочного материала для пола, стен и т. д. В качестве покрытий (связующих) применяется преимущественно пластифицированный ПВХ. Наряду с текстильной тканью в качестве основы используется бумага (для упаковки, книжных переплетов и др.).

Кроме поливинилхлорида для нанесения покрытий на гибкую основу применяются другие полимеры и эластомеры — такие, как полиуретаны, полиакрилаты, поливинилацетаты и другие. Самыми «старыми» материалами для нанесения покрытий

Таблица 8.1. Способы образования покрытия

Форма исходного сырья	Состояние полимера в промазочной машине	Принцип образования пленки	Тип полимера
Гранулят, порошок, хлопья	Раствор в органическом растворителе	Сушка	Полиуретан, нитрат целлюлозы
Водная суспензия	Жидкость	Сушка и плавление	Поливинилацетат, полиакрилаты
Порошок + пластификатор	Пластизоль	Желатинизация	Поливинилхлорид
Гранулят	Расплав	Охлаждение	Полиэтилен
Олигомеры и мономеры	Жидкость	Полимеризация, сшивание	Полиуретан

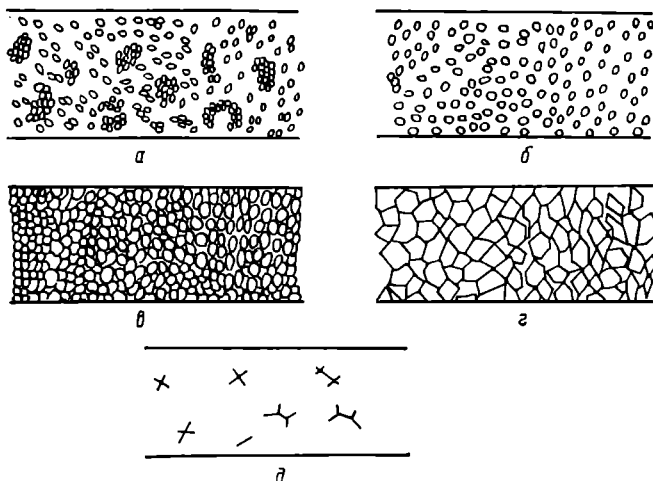


Рис. 8.1. Стадии процесса желатинизации пластизоль (пленкообразования).
Пояснение в тексте.

являются пленкообразующие масла (для производства линолеума и клеенки) и нитраты целлюлозы.

Наносимые на основу связующие находятся в жидком или высоковязком состоянии (исключение составляет покрытие материала основы готовой пленкой). Применение полимеров в жидком состоянии позволяет наносить тонкие покрытия на большую поверхность с минимальными энергозатратами, а также обеспечивает частичную пропитку связующим и лучшее сцепление покрытия с материалом основы. После нанесения покрытий из жидкого полимера образуется прочная пленка.

В табл. 8.1 в зависимости от типа полимера и формы исходного сырья указаны принципы образования пленки покрытия. По масштабу производства покрытия из пластизоль занимают ведущее место. Это объясняется тем, что порошкообразные эмульсионные ПВХ хорошо диспергируются в пластификаторах. Эти пластизоль (пасты из ПВХ и пластификатора) можно хранить при комнатной температуре в течение суток без опасения седиментации (осаждения частиц). Кроме того, они обладают хорошей текучестью, что весьма важно при нанесении покрытий. Путем добавления растворителя можно уменьшать их вязкость. Такие пасты называются органолиолями (ПВХ + пластификатор + растворитель).

Частицы ПВХ в пластификаторе находятся в виде суспензии или отдельных агломератов (рис. 8.1, а). Под воздействием тепла (333 К) и пластификатора происходит диспергирование агломератов (рис. 8.1, б), а затем набухание частиц ПВХ (рис. 8.1, в). При температуре 373 К достигается полная (сквозная) пропитка (рис. 8.1, г), а при 433 К происходит плавление

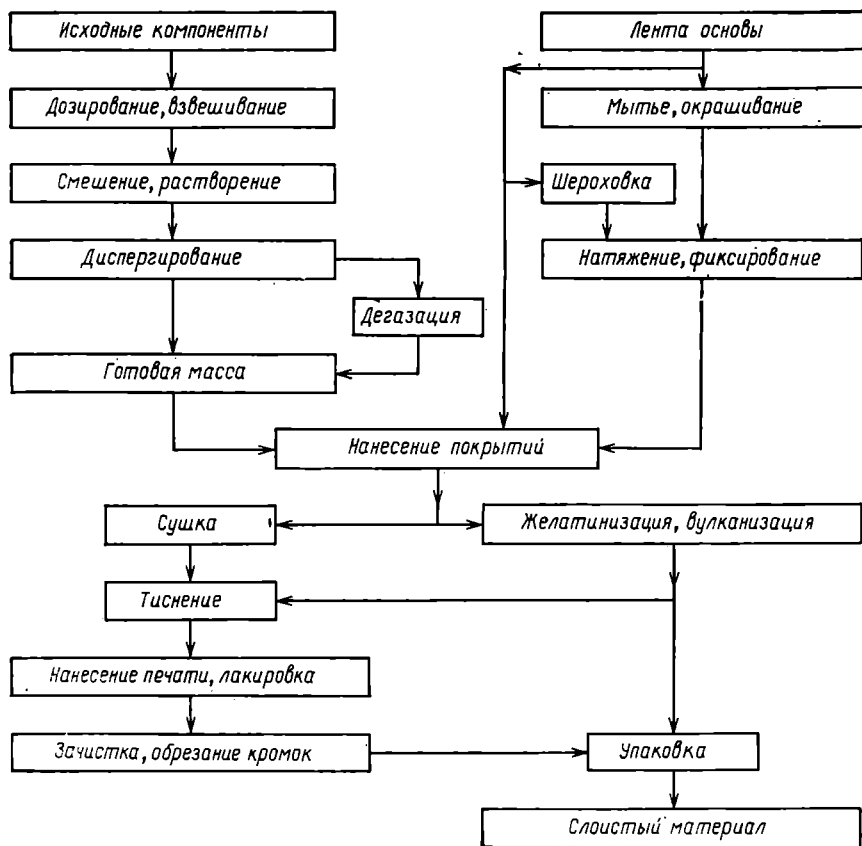


Рис. 8.2. Основные стадии процесса нанесения полимерных покрытий на текстильную основу (например, при производстве искусственной кожи)

ИВХ, за счет чего границы контакта набухших частиц размываются (рис. 8.1, д).

В состав связующего кроме пленкообразующих компонентов входят и другие добавки с различными функциональными назначениями, такие как пигменты, термо- и светостабилизаторы, разбавители, смазывающие вещества, наполнители и др.

Процесс нанесения покрытий состоит из собственно нанесения покрытия, образования пленки (образования геля полимера и удаления растворителя) и связанных с этим процессов нагрева, сушки и охлаждения.

Различают прямой способ нанесения покрытий (непосредственное нанесение покрытий на основу) и косвенный способ — нанесение полимерной пасты на транспортную ленту (рис. 8.2).

Кроме нанесения покрытий на соответствующих предприятиях предусмотрены подготовительные и завершающие рабочие операции. Подготовительные операции включают транспор-

тировку и хранение исходных компонентов смеси, а также такие процессы, как смешение исходных компонентов и подготовка материала основы. Завершающие операции включают в себя придание готовой продукции товарного вида и упаковку.

8.2. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛАСТИЗОЛЕЙ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ «МОКРЫМ» СПОСОБОМ

Для приготовления пластизоль для нанесения покрытий (согласно заданной рецептуре) исходные компоненты смеси необходимо дозировать в правильном соотношении и перемешивать. В процессе смешения под действием напряжений сдвига происходит диспергирование порошкообразных компонентов смеси (порошкообразного ПВХ, пигментов, наполнителей) в жидком пластификаторе. Одновременно смесь нагревается. В то время как при комнатной температуре между ПВХ и пластификатором наблюдается слабое взаимодействие, с повышением температуры ускоряется процесс набухания частиц полимера. Длительная выдержка при температуре выше 300 К вызывает увеличение вязкости, что может привести к непригодности пластизоля. Путем охлаждения корпуса смесителя и снижения трения валков можно значительно уменьшить степень разогрева приготавливаемой массы.

Несмотря на специальное конструктивное исполнение перемешивающего устройства, его действия недостаточно, чтобы обеспечить хорошее диспергирование (прежде всего частиц пигментов). Поэтому в таких случаях применяются циркуляционные смесители (рис. 8.3, а) и смесители с вращающимся корпусом — «диссоolverы» (рис. 8.3, б), а также диспергаторы различных типов (рис. 8.4).

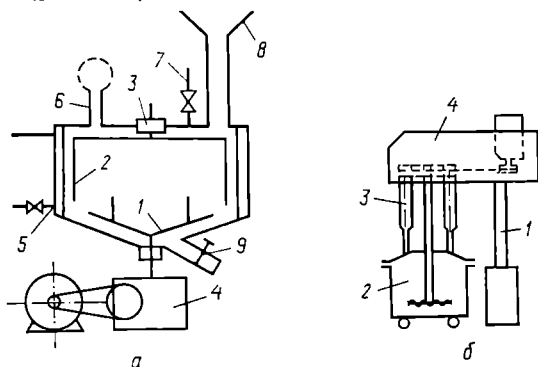


Рис. 8.3. Принципиальные схемы смесителей, применяемых при изготовлении пластизоль:

а — циркуляционный смеситель (1 — мешалка с отдельным приводом; 2 — воронитель, приводимый во вращение перемешиваемой средой; 3 — тормозное устройство; 4 — приводная станция; 5 — штуцер для подвода теплоносителя; 6 — дегазационный штуцер с фильтром; 7 — трубопровод для подачи жидких компонентов (пластификаторов); 8 — люк загрузки ПВХ; 9 — выгрузной люк; б — диссоolver — смеситель с вращающимся корпусом [1 — стойка; 2 — вращающийся корпус смесителя (привод условно не показан); 3 — устройство для подъема и опускания крышки; 4 — привод мешалки].

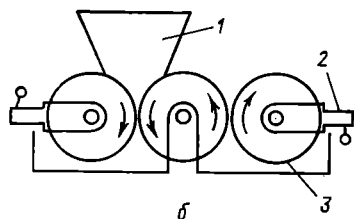


Рис. 8.4. Оборудование для диспергирования порошкообразных компонентов в жидкой среде (пластификаторе, растворителе):

а — трехвалковый диспергатор (1 — загрузочный бункер; 2 — гидравлические или механические устройства для регулирования межвалкового зазора; 3 — ракли); б — дисковый многоярядный диспергатор [1 — дозировочный (шестеренчатый) насос для подачи материала; 2 — корпус; 3 — сито; 4 — перемешивающее многоярядное дисковое устройство].

Во многих случаях при смешении желательно избегать попадания частиц воздуха в пластизоль. Воздушные включения уменьшают прочность полимерной пленки и ухудшают ее прозрачность. Попадания воздушных пузырьков можно избежать вакуумированием, которое осуществляется в процессе смешения или в специальных непрерывно действующих устройствах для дегазации. Так как диспергирование пигментов, смазывающих веществ и других компонентов смеси существенно труднее, чем диспергирование ПВХ, то оно осуществляется в специальных машинах (диспергаторах). Для этого, например, пигмент пере-

Таблица 8.2. Операции приготовления пластизоль и применяемое оборудование

Операции	Оборудование для периодического производства	Оборудование для непрерывного производства
Дозирование	Весы, дозаторы, насосы	Ленточные весы, вибротолчки, дозировочные насосы, червяки, дозировочные вентили
Смешение, гомогенизация, растворение, набухание, желатинизация Диспергирование, измельчение	Z-образные, планетарные, волчковые, скоростные смесители Шаровые мельницы, скоростной смеситель («дис-солвер»)	Проходные смесители, смесительные головки, статические смесители Одновалковая или трехвалковая краскотерка, коническая мельница, мельница ударного действия
Дегазация, фильтрация	Планетарная машина с вакуумированием, «дис-солвер» с вакуумированием, фильтр с вакуумированием	Вакуумный дегазатор непрерывного действия
Транспортировка готовой массы	Ковш	Поршневой насос, червячный насос

мешивается с частью пластификатора с образованием цветной пасты. Эта паста гомогенизируется и диспергируется, и полученный концентрат краски (маточная краска) смешивается с пластизолом.

В табл. 8.2 указано оборудование, применяемое для проведения различных операций приготовления пластизолов. В табл. 8.3 указаны рецептуры пластизолов (в масс. ч).

Назначение рецептур: 1 — для внешнего слоя при производстве искусственной кожи; 2 — для вспененного слоя при производстве пористой искусственной кожи; 3 — для основного слоя при производстве плиток для полов; 4 — для внешнего слоя при производстве плиток для полов.

Время смешения указанных рецептур составляет 30—120 мин. (включая время загрузки и выгрузки) при емкости смесителя 500—3000 л. Основные компоненты пластизоля (порошкообразный ПВХ и пластификатор) должны обладать реологическими свойствами и жизнеспособностью, соответствующими предъявляемым требованиям. Важнейшим свойством порошкообразного ПВХ является размер зерен, а пластификатора — его вязкость. Свойства порошкообразного ПВХ (с двумя различными значениями константы Фикентчера), применяемого в качестве полимерной матрицы при производстве пластизоля, приведены ниже:

Константа Фикентчера	59	70
Насыпная плотность, кг/м ³	300	500
Содержание щелочи, %	0	0,3
Влажность при 373 К, %	0,1	0,4
Потребность в масле для увлажнения, г/л	35	50
Фактор набухания при 328 К	1,8	5,0
Средний размер частиц, мкм	1	50
Вязкость, МПа·с	3000	10000

Ниже приведена характеристика пластификаторов для ПВХ:

Пластификатор	Плотность при 293 К, кг/м ³	Вязкость при 293 К, МПа·с	Температура кипения, К
Бензилбутилфталат	1124	50	372
Дибутилфталат	1045	19—22	359
Диизодециладипинат	921	24—28	421
Диизодецилфталат	967	115—130	398
Диизононилфталат	980	155—175	390
Диизотридецилфталат	957	300	413
Диэтилгексиладипинат	920	13—15	398
Диэтилгексилфталат	985	80—85	385
Диоктилсебагинат	916	21—22	420
Трикрезилфосфат	1178	75—85	345
Триэтилгексилфосфат	924	13—15	384
Хлорпарафин (30%-ный)	1031	26	433

8.3. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ РАСТВОРОВ

Экономические преимущества пластизолов можно технически реализовать только для ПВХ. Применение же покрытий на основе растворов позволяет применять для этих целей множе-

Таблица 8.3. Рецептуры пластизолой (в масс. ч)

Компоненты смеси	Номера рецептур смеси			
	1	2	3	4
Порошкообразный ПВХ	100	100	100	100
Основной пластификатор (диоктил-фталат)	45—60	45—70	60—90	40—50
Вторичный пластификатор (хлорпарафин)	До 10	До 15	15—30	До 10
Пигмент неорганический	5—20	До 5	—	—
Пигмент органический	До 2	До 1	—	—
Наполный (порошкообразный мел)	—	До 20	150—200	—
Термостабилизатор	До 1	—	—	0,5—1
Разбавитель пасты	До 2	До 2	2—5	1—2
Смазывающее вещество	—	1,5—2,5	—	—
Активатор смазки	—	1,5—2,5	—	—

ство типов пластмасс. Наиболее старыми разновидностями покрытий на основе растворов являются гуммированные покрытия и покрытие нитратом целлюлозы, а наиболее современными — покрытия на основе растворов полиуретана и хлорсульфированных полиэтиленов. Растворение полимеров осуществляется в смесителе, снабженном обратным холодильником.

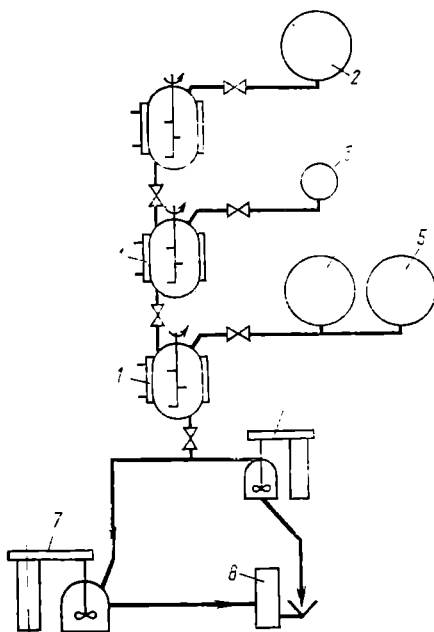
В рубашку смесителя в зависимости от технологического режима подаются горячий или холодный теплоносители для ускорения процесса растворения или охлаждения раствора перед его сливом.

Процессы подготовки пигментов и других компонентов, таких как цветная паста (пигменты растертые в растворителе) и цветные гранулы (пигменты, введенные в полимер) осуществляются в отдельных смесителях (рис. 8.5).

Перед употреблением смесь всегда фильтруется для удаления желеобразных и других частиц и подвергается дегазации с целью удаления воздушных включений. Фильтрация и дегазация необходимы для получения качественного по-

Рис. 8.5. Принципиальная схема процесса приготовления массы (раствора) для нанесения покрытий из полиуретана:

1 — автоклавы; 2 — емкость для полиэфира; 3 — емкость для изоцианата; 4 — емкость для диметилформамида (растворителя); 5 — емкость для гликолей (для роста цепи макромолекул); 6 — диспергатор пигментов и других добавок; 7 — смеситель (усреднитель) для готовой массы; 8 — промежуточная емкость.



крытия. При добавлении растворителей требуется соблюдать особые меры предосторожности, связанные с токсичностью и пожароопасностью среды (закрытая система, интенсивная вентиляция, отсутствие искрения в электрических проводах и нагревателя).

Ниже приведены характеристики наиболее распространенных растворителей, применяемых при нанесении полимерных покрытий:

Растворитель	Плотность при 293 К, кг/м ³	Температура кипения, К	Температура воспламе- нения, К
Автомобильный бензин	770—790	413—483	303—333
Ацетон	792	328	254
n-Бутилацетат	881	399	297
Диметилформамид	949	426	330
Диоксан	1034	374	278
Изопропанол	789	351	285
Ксиленол	874	409—415	298
Метанол	791	338	279
Метилацетат	934	330	260
Метиленгликоль	966	397	411
Метилциклогексанон	919	436	321
Метилэтилкетон	805	353	259
Тетралин	971	480	351
Тетрахлорэтан	1594	349	—
Толуол	866	384	278
Трихлорформетан	1490	297	—
Трихлорэтилен	1466	360	—
Циклогексанол	949	434	343
Циклогексанон	945	428	317
Этанол	789	355	285
Этилацетат	901	350	268
Этиленгликоль	931	408	316
Этиленгликоляцетат	972	429	325

На практике часто применяется смесь растворителей. При этом придерживаются простых соображений: дорогой растворитель смешивается с дешевым, низкикипящий — с высококипящим, чтобы ускорить процесс сушки; некоторые связующие растворяются лучше в смеси растворителей.

8.4. ПРИГОТОВЛЕНИЕ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ВОДНОЙ СУСПЕНЗИИ ПОЛИМЕРОВ

В тех случаях, когда полимер получается в виде водной дисперсии в процессе суспензионной полимеризации, можно непосредственно получать полимерные композиции для нанесения покрытий. Благодаря этому отпадают подготовительные работы, связанные с превращением полимера в порошок или его гранулированием и, кроме того, отпадает необходимость применения растворителей. Эти преимущества, однако, не всегда можно использовать, так как некоторые полимеры трудно или невозможно получать суспензионным методом; водные сус-

пензии полимеров сушатся медленнее, чем растворы; пленки из водной суспензии полимеров менее прочны и менее водостойки, чем пленки, полученные из растворов; суспензии проявляют склонность к коагуляции.

Для приготовления исходной композиции применяют поливинилацетат, полиакрилаты, поливинилиденхлорид, латекс натурального каучука, латексы синтетических каучуков, полистиролы и т. д.

Водные суспензии содержат 40—50% твердых частиц полимеров, и для приготовления композиций, применяемых для нанесения покрытий, они слишком низковязки. Добавлением специальных веществ можно добиться увеличения вязкости. Для этих целей применяются водорастворимые соли полиакриловых кислот, водорастворимые полимеры — поливиниловый спирт, карбоксиметилцеллюлоза, казеиновый клей и др. Приготовление композиций в этом случае производится аналогично приготовлению паст и растворов. Маточные пигменты, наполнители и другие порошкообразные компоненты вводятся в воду при одновременной загрузке суспенгатора и стабилизатора и диспергируются до тех пор, пока не образуется водная суспензия.

8.5. ПРИГОТОВЛЕНИЕ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ МОНОМЕРОВ И ОЛИГОМЕРОВ

Из различных низкомолекулярных исходных и промежуточных продуктов производства полимеров связующими при нанесении покрытий могут служить вещества, обладающие необходимой вязкостью. Требуемая вязкость достигается форполимеризацией или смешением компонентов с различной степенью полимеризации. Растворители при этом не применяются, так как их роль выполняют мономеры, содержащиеся в пленке.

Технология приготовления смеси в этом случае такая же, как при получении растворов. Выбор полимера ограничен требованием быстрой сушки пленки, по скорости сравнимой, например, с сушкой пленки из растворов. Примером может служить полиуретановая композиция горячего отверждения и олигомеры акрилата.

Особое место занимают двухкомпонентные смеси полиуретана (например, из полиэфира и изоцианата), так как в этом

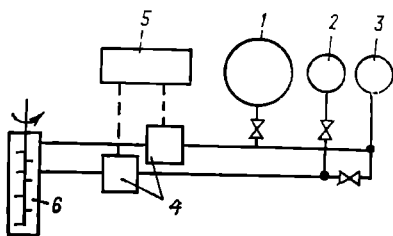


Рис. 8.6. Принципиальная схема процесса приготовления полиуретановой композиции с помощью смесительной головки:

1 — емкость для полиэфира, предварительно смешанного с другими компонентами и дегазированного; 2 — емкость для изоцианата; 3 — емкость для растворителя; 4 — дозировочные насосы; 5 — регулируемый привод дозировочных насосов; 6 — смесительная головка.

случае смешение и нанесение покрытий должны следовать друг за другом. Это означает, что необходимую смесь нельзя готовить заранее; ее приготавливают только непосредственно перед нанесением покрытий в специальных смесительных головках. Пигменты и другие вспомогательные вещества следует вводить только в один из компонентов — в полиэфир (рис. 8.6). Требуется предохранять смеси от попадания влаги.

8.6. ДРУГИЕ КОМПОЗИЦИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

В технологии нанесения покрытий из термопластов (нанесение расплавов полимеров) связующие применяются в виде порошка, гранул, кусков, блоков. При этом порошки агломерируются со вспомогательными веществами, реже из них приготавливаются пасты. Процесс смешения исходных компонентов часто совмещается с процессами пластикации (плавления). Термопластичные покрытия наносятся преимущественно из пластифицированного ПВХ и полиэтиленов. В некоторых случаях наносятся покрытия непосредственно из порошков с последующей термообработкой.

8.7. ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

8.7.1. Нанесение покрытий с помощью раклей

Назначение раклей — равномерное распределение полимерной композиции (пасты) на поверхности основы.

Лента материала (основы) при этом предохраняется от провисания натяжением самой ленты (рис. 8.7, а), резиновой лентой (рис. 8.7, б), гуммированными или стальными валками (рис. 8.7, в). Ракля стационарно ввернута в балку, и этим самым предотвращается ее смещение под действием усилий, возникающих в рабочем зазоре в процессе производства. Обычно ракля устанавливается вертикально или под углом к ленте материала основы. Иногда применяется горизонтальное расположение раклей.

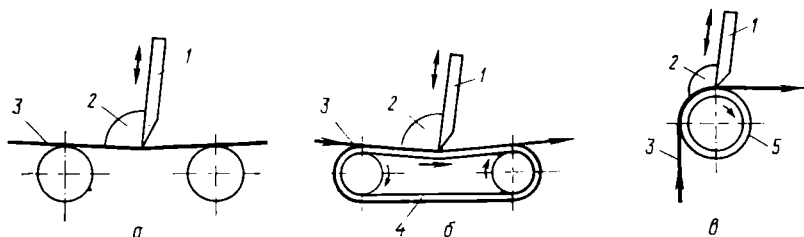


Рис. 8.7. Нанесение покрытий с помощью раклей:

а — без подпорной ленты; б — на резиновой подушке (на транспортной ленте); в — на валковой поверхности; 1 — ракля; 2 — масса полимера (паста); 3 — лента основы; 4 — резиновая транспортная лента; 5 — валок.

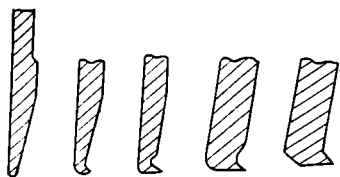


Рис. 8.8. Конструкции раклея.

Конструкции применяемых раклея показаны на рис. 8.8.

Вертикальное расположение ракли возможно как с одной, так и с обеих сторон ленты. При совместной работе ракли с вальками необходимо обеспечивать зазор между гребнем ракли и вальком во избежание износа ленты.

Утечки материала через края ленты предотвращаются применением ограничительных пластин (шпателей), которые установлены на балке раклея. Шпатели вручную или автоматически могут зачищать края ленты основы.

На толщину наносимого покрытия оказывают влияние множество факторов, так что невозможно лишь предварительным выбором положения ракли добиться необходимой толщины покрытия. Поэтому непосредственно после получения первой порции покрытия необходимо определить его толщину (с помощью изотопных измерительных приборов), чтобы затем путем подбора найти такое положение ракли, которое обеспечило бы заданную толщину покрытия.

Ниже приведены факторы, влияющие на толщину пленки, при нанесении покрытий с помощью раклея [$++$ — сильное влияние фактора; $+$ — умеренное, $(+)$ — незначительное влияние; o — отсутствие влияния]:

	Ракля и резиновая подложка	Ракля и валик
Положение ракли (высота зазора)	$+$	$++$
Угол наклона ракли	$+$	$++$
Ширина гребня ракли	$++$	$+$
Скорость нанесения покрытий	$+$	$(+)$
Твердость резиновой подложки	$+$	o
Вязкость наносимой массы	$+$	$(+)$

Усилие F , действующее на раклю во время нанесения покрытий, определяется следующей формулой:

$$F = \frac{\eta_n G b^2}{\rho \delta^3} \quad (8.1)$$

η_n — вязкость полимерной пасты; G — массовый расход; b — ширина ракли; ρ — плотность пасты; δ — толщина покрытия (пленки).

Для компенсации прогиба под действием распорного усилия или инородных включений ракли устанавливаются на регулируемых устройствах (корпусах). Полимерная масса из емкостей, расположенных над лентой, вручную или с помощью насосов подается на ленту непосредственно перед раклями.

Таблица 8.4. Скорость сдвига в зазоре между раклей и лентой в зависимости от скорости нанесения покрытия и толщины слоя покрытия

Скорость нанесения покрытия, м/мин	Скорость сдвига (с ⁻¹) при толщине покрытия (мм)					
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	333	167	83	55	42	33
5	1666	833	417	278	208	167
10	3333	1666	833	555	417	333
20	6666	3333	1666	1110	833	666

При нанесении покрытий масса материала перед раклями совершает циркуляционное движение. При этом необходимо запас материала перед раклями поддерживать на постоянном уровне (визуально или с помощью автоматического контроля). Большое влияние на процесс нанесения покрытий оказывает скорость сдвига в зазоре между раклей и лентой (табл. 8.4).

8.7.2. Нанесение покрытий с помощью валков

Возможности нанесения покрытий мокрым способом при помощи валков разнообразны. Принцип мокрого способа нанесения покрытий заключается в том, что дозированное количество материала полностью или частично (но регулируемо), наносится на материал основы. Промазочный валок может быть гладким или рифленным, он может вращаться в том же направлении, в котором движется лента основы, или в противоположном (рис. 8.9). Для промазки применяется один или несколько валков, которые служат для дозирования наносимого на ленту полимера. При нанесении покрытий только один валок непосредственно погружается в запас полимера, а остальные валки являются дозирующими. Грубое дозирование обеспечивается поддержанием некоторого слоя материала на поверхности промазочного валка в зависимости от частоты его

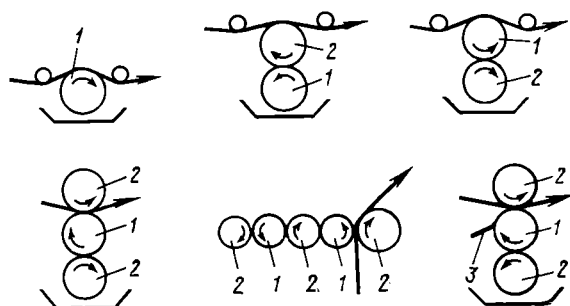


Рис. 8.9. Варианты валкового способа нанесения покрытий:
1 — стальные валки; 2 — гуммированные валки; 3 — ракли.

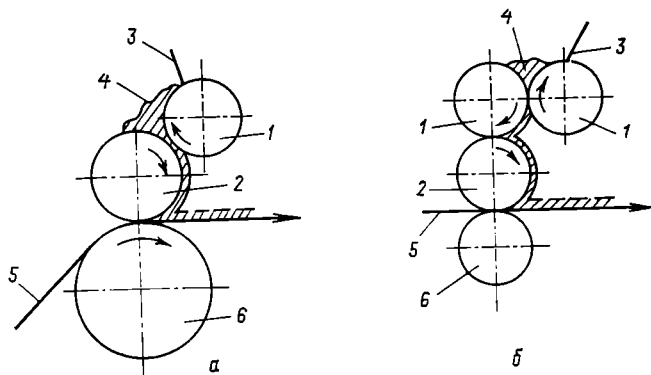


Рис. 8.10. Принципиальные схемы прямого (а) и обратного (б) нанесения покрытия валковым способом:

1 — стальные валки; 2 — гуммированные валки; 3 — ракля; 4 — паста полимера; 5 — лента основы; 6 — опорный валок.

вращения и вязкости наносимого материала. Наиболее распространенным способом дозирования является применение гладкого промазочного валка и подпорного гуммированного валка в сочетании с направляющими роликами; при этом все валки имеют регулируемый привод и устройства для регулирования межвалкового зазора.

При применении металлической транспортной ленты промазочный валок гуммируется (рис. 8.10). Кроме промазочного валка предусмотрены два дозирующих валка.

8.7.3. Другие способы нанесения покрытий

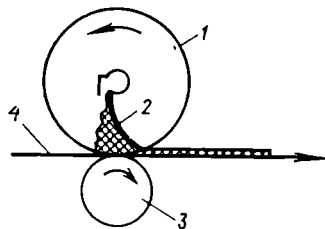
Для нанесения покрытий применяются и другие способы, представляющие собой комбинацию промазки с ротационным способом нанесения покрытий под давлением. К ним относятся фильтрационный способ нанесения покрытий (рис. 8.11) и способ нанесения покрытий под давлением.

При фильтрационном способе масса полимера с помощью ракли продавливается через перфорированный барабан на материал основы в виде многочисленных струек; количество наносимого материала зависит от размеров ячеек (отверстий) решетки, положения ракли, вязкости массы и толщины стенки барабана. Подбором соответствующих параметров можно добиться того, что отдельные выдавливаемые струйки образуют сплошной слой покрытия.

При нанесении покрытий под давлением внутренняя полость прижимного валка заполняется наносимым материалом, который затем продавливается через решетку на материал основы. При этом может иметь место и струйный режим нанесения покрытий. Подбором соотношения скоростей ленты материала

Рис. 8.11. Принципиальная схема установки для фильтрационного способа нанесения покрытия:

1 — перфорированное тонкостенное цилиндрическое сито; 2 — ракла с регулируемым зазором для распределения наполнителя; 3 — опорный валок; 4 — лента основы.



основы и поверхности валка можно исключить струйный режим нанесения покрытий.

Следующим способом нанесения покрытий является разбрызгивание раствора полимера на ленту основы. В большинстве случаев применяются два шприцевочных пистолета для разбрызгивания раствора поперек направления движения ленты основы или до восьми шприцевочных пистолетов, которые совершают круговые движения над движущейся лентой основы. При круговом движении по краям ленты наносится избыток полимера; во избежание этого круговая траектория движения пистолетов не должна выходить за края ленты основы. Количество наносимого материала регулируется давлением в шприцевочном пистолете, размером его мундштука, частотой вращения ротора пистолета и скоростью движения ленты материала основы.

Для определения линейной скорости движения ленты v_l в этом случае используется формула:

$$n_p = 500 \frac{v_{ni}}{b_j} \quad (8.2)$$

где n_p — частота вращения ротора пистолета; i — число слоев покрытий; b — ширина ленты материала основы; j — число пистолетов, установленных над лентой.

Благодаря отсутствию воздействия давления на основу при подобном способе нанесения покрытий в этом случае исключается пропитка материала основы связующим, а также обеспечивается возможность нанесения покрытия на непрочную основу без опасности ее повреждения.

8.7.4. Сушка и желатинизация

После процесса нанесения покрытий необходимо обеспечить образование пленки из формуемой массы полимеров. Длительное пребывание вязкой массы на пористой основе приводит к пропитке материала основы (под действием капиллярных сил и сил тяжести). При отклонении от горизонтальности положения ленты основы наносимая масса полимера стекает. Для пленкообразования необходим подвод соответствующего количества тепла. Подвод тепла может осуществляться путем конвекции

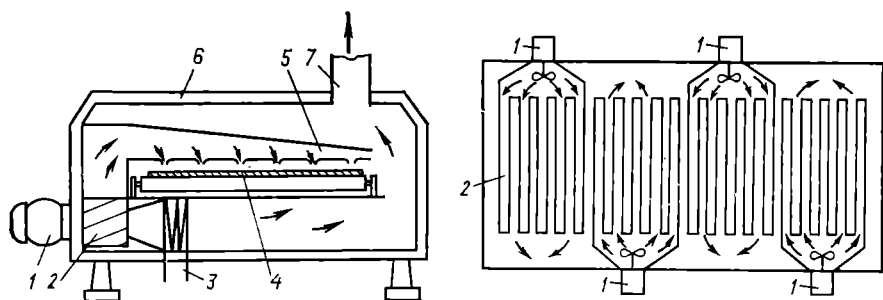


Рис. 8.12. Сушильное устройство с транспортной лентой:

1 — электродвигатель; 2 — вентилятор; 3 — нагревательный элемент; 4 — транспортная лента; 5 — перегородка; 6 — корпус сушилки; 7 — лок отсоса воздуха.

Рис. 8.13. Принципиальная схема сушилки:

1 — вентиляторы с приводом; 2 — сопловая панель.

(каналы для горячего воздуха), теплоизлучения (инфракрасные излучатели) и теплопередачи (барабанные сушилки).

Поскольку при пленкообразовании происходит удаление летучих (мономеров, растворителей, паров пластификаторов), то необходимо путем отсоса (вакуумирования агрегатов) исключить их попадание в производственное помещение. Во избежание тепловпотерь необходима изоляция нагревательных элементов. По этим причинам пленкообразование осуществляется в агрегатах, изолированных специальными кожухами. Важнейшими конструктивными элементами сушильных агрегатов и агрегатов для желатинизации являются: теплоизолированная полость печи; система обогрева; система транспортировки ленты материала; система вентиляции; система измерения и регулирования температуры.

Наиболее равномерный нагрев в области температур около 470 К обеспечивают системы обогрева, показанные на рис. 8.12 и 8.13. Источником тепла для нагрева воздуха могут служить теплообменники (косвенный нагрев сушильной камеры) или горелки (прямой нагрев камеры). Прямой нагрев обладает тем преимуществом, что быстро устанавливается необходимый темпе-

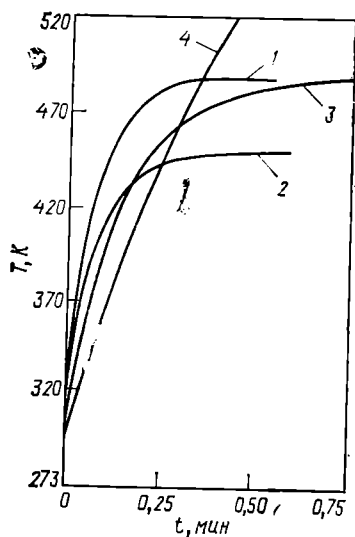


Рис. 8.14. Кинетика процесса нагрева ленты основы:

1 — обдув ленты основы при плотности покрытия 300 г/м² с помощью сопел при температуре воздуха 493 К; 2 — то же при температуре воздуха 453 К; 3 — то же, при плотности покрытия 600 г/м² и температуре воздуха 493 К; 4 — нагрев с помощью инфракрасного излучения.

ратурный режим работы и обеспечивается лучшее использование тепловой энергии, но он не пригоден для удаления растворителей. При сушке горячим воздухом температура подсушиваемого материала асимптотически приближается к температуре окружающего воздуха (рис. 8.14). При сушке в барабанных сушилках температура сушки ограничивается температурой барабана. Сушка инфракрасным излучением обладает тем недостатком, что нельзя точно регулировать температуру сушки и обеспечивать равномерность нагрева ленты.

8.8. АГРЕГАТЫ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

В состав агрегатов для нанесения покрытий на ленту основы включаются следующие комплектующие устройства: 1) размоточная станция (или транспортные вагонетки для исходного материала) с барабаном и тормозом; 2) накопитель ленточного, лоткового или валкового типа (рис. 8.15); 3) расширительные валки для распрямления краев ленты; 4) приспособление для обеспечения прямолинейности движения; 5) приспособление для обрезания кромок; 6) приспособление для транспортировки и предохранения от провисания исходного материала (транспортные ленты, перфорированные ленты, натяжное устройство); 7) гладильное устройство и устройство для нанесения тиснения; 8) устройство для охлаждения; 9) намоточное устройство; 10) устройство для регулирования натяжения ленты материала основы для обеспечения постоянства ее линейной скорости; 11) общая приводная станция; 12) устройства для подачи наносимой массы полимера (насосы, регулируемые вентили).

Нанесение покрытий можно производить непосредственно на исходный материал основы (прямой способ нанесения покрытий) или с помощью специальных вспомогательных устройств (обратный способ нанесения покрытий).

Как при прямом, так и при обратном способах нанесения покрытий воздух, отсасываемый из сушильных камер, содержит такие вредные примеси, как пары растворителей, пластификаторов и мономеров. Поэтому перед выбросом в окружающую среду он должен быть подвергнут тщательной очистке.

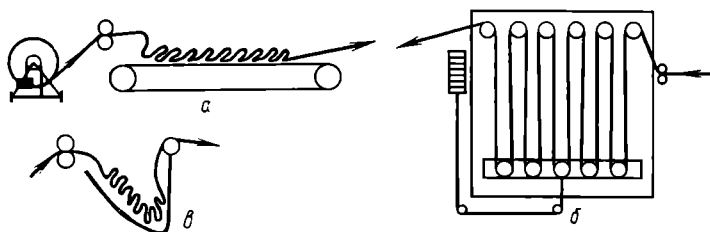


Рис. 8.15. Принципиальные схемы накопителей лент:
а — ленточного типа; б — лоткового типа; в — валкового типа.

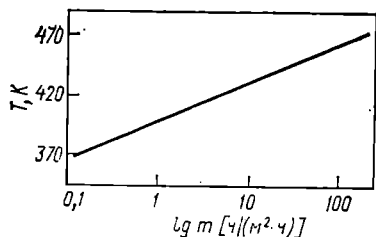


Рис. 8.16. Зависимость количества пластификатора (диоктилфталата) m , удаляемого из ПВХ, от температуры сушки T

Количество растворителя, уносимого воздухом, легко рассчитать из исходных данных о растворе полимера. Количество летучих, выделяющихся из пластификатора, зависит от типа и количества пластифи-

катора, температуры сушки, давления, количества воздуха, подаваемого в сушильную камеру, и размеров покрытий. На рис. 8.16 представлена зависимость количества диоктилфталата (пластификатора), удаляемого при равномерной подаче воздуха, от температуры сушки.

8.9. КАЛАНДРОВАНИЕ ПЛАСТМАСС

Каландрование пластмасс применяется для получения листовых и пленочных материалов, а также для одностороннего или двухстороннего нанесения покрытий на текстильные ткани и бумажное полотно. Уже с середины девятнадцатого столетия каландры применялись для гуммирования различных тканей натуральными каучуками. Примерно в это же время возникло производство линолеума каландровым способом. Современные каландры для переработки пластических масс сохранили основные конструктивные признаки первых каландров.

Каландрование синтетических полимеров начали применять только с 1930 года с возникновением производства ПВХ. Даже в настоящее время почти половина производимого во всем мире ПВХ (непластифицированного и пластифицированного) перерабатывается каландрованием, так что поливинилхлорид можно отнести к основным типам полимеров, перерабатываемых на каландрах. На каландрах можно также перерабатывать и другие типы пластмасс, такие, например, как полиуретан, полистирол, сополимеры винилхлорида, винилацетата, акрилонитрила, стирола, различные полимерные компаунды и синтетические каучуки. Кроме пленок, каландровым способом изготавливаются листы, слоистые пластики и т. д.

Перед каландрованием в полимер добавляется множество компонентов. Предварительно все исходные компоненты перемешиваются. Порошкообразные добавки должны быть хорошо диспергированы. При этом применяется сухой метод смешения (рис. 8.17).

Перед загрузкой массы на каландр следует произвести ее пластикацию. При прохождении через межвалковые зазоры каландра (от одного до трех зазоров) происходит формование массы в пленку или пропитка тканевой основы.

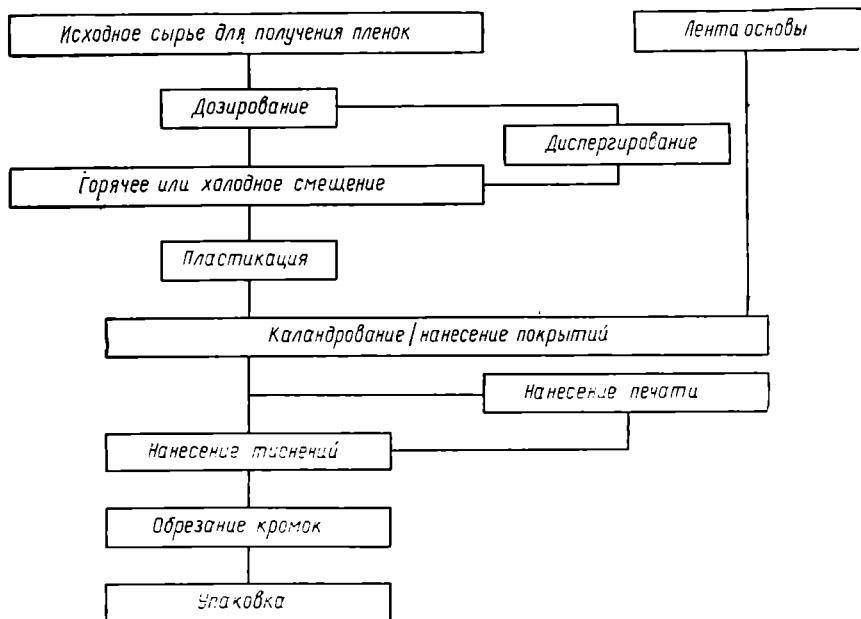


Рис. 8.17. Операции технологического процесса каландрования (получения пленки и нанесения печати).

Загрузка каландра может быть как периодической, так и непрерывной, но формование и отбор пленки осуществляется непрерывно.

На пути к приемному устройству с пленки срезаются неровные продольные кромки, после чего производится тиснение, нанесение глянца, ориентация и охлаждение.

8.9.1. Приготовление исходных смесей

Используют два способа смешения исходных компонентов смеси — холодное и горячее смешение. При холодном смешении исходные компоненты (ПВХ, сополимеры, пластификаторы, стабилизаторы, смазывающие вещества, пигменты, наполнители и др.) загружаются в необходимой пропорции (с помощью соответствующих дозаторов) в камеру тихоходного смесителя и перемешиваются без подвода тепла извне. В зависимости от содержания жидких компонентов получается увлажненная масса или паста. Из-за отсутствия диспергирования частиц компонентов смеси холодное смешение применяется только в том случае, если перед каландрованием предусмотрена операция пластикация исходной смеси, при которой достигается достаточная степень диспергирования.

При горячем смешении благодаря действию повышенных напряжений сдвига (за счет увеличения частоты вращения ме-

Таблица 8.5. Состав смеси на основе ПВХ, перерабатываемой каландрованием

Компоненты смеси	Назначение	Содержание, масс. ч.
ПВХ	Связующее	50—95
Пластификатор	Придание необходимого модуля упругости	До 32
Стабилизатор	Защита от термодеструкции	0,5—3
Пигмент	Окраска	До 15
Наполнители	Удешевление, придание необходимых свойств	До 20
Смазывающее вещество	Улучшение съема с каландра	0,2—2
Другие добавки	Антистатика, антиоксиданты, поглотители ультрафиолетовых лучей и др.	0,5

шалки) достигается хорошее качество диспергирования. Исходные компоненты смеси так же, как и при холодном смешении, в необходимых соотношениях загружаются в смесители с обогреваемыми стенками, при этом образуются агломераты. Обычно применяются скоростные смесители, чтобы смесь могла перейти в псевдооживленное состояние. Сначала в такой смеситель загружаются в необходимом соотношении порошкообразные компоненты. После разогрева и перевода их в псевдооживленное состояние добавляются жидкие компоненты. Благодаря этому исключается образование пасты. При температуре 380—420 К образуется горячая смесь, которая во избежание разложения переводится в смеситель холодного смешения с температурой около 320 К, там охлаждается и затем выгружается.

Выбор исходного сырья для каландрового способа переработки определяется, с одной стороны, исходя из требований к конечному продукту (изделию), а с другой стороны, с учетом требований технологии (технологических возможностей каландрования). Технология каландрования требует применения полимеров или их смесей, которые могли бы перерабатываться в широком интервале температур (от 423 до 473 К) и имели бы при этом высокую вязкость расплава.

В табл. 8.5 приведены основные компоненты смеси на основе ПВХ, перерабатываемой каландрованием, и их назначение.

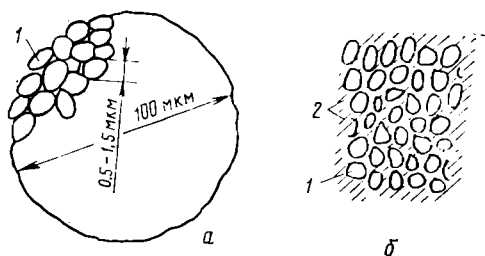
8.9.2. Пластикация исходной смеси

Назначением пластикации исходной смеси перед ее загрузкой на каландры является: 1) разогрев смеси до температуры переработки; 2) растворение в жидких и низкомолекулярных компонентах смеси остальных составляющих; 3) диспергирование частиц порошкообразных компонентов; 4) гомогенное (равномерное) распределение всех компонентов.

В случае применения в качестве связующего ПВХ во время пластикации происходит также структурообразование внутри

Рис. 8.18. Схематическое изображение структуры ПВХ суспензионного (а) и в пленке (б):

1 — глобула; 2 — ударопрочный модификатор.



отдельных частиц. Электронной микроскопией обнаружены как первичные образования эмульсионного ПВХ размером $0,5 - 2 \text{ мкм}$, так и глобулы суспензионного ПВХ размером $30 - 300 \text{ мкм}$ (рис. 8.18), которые образуют микроблоки.

Степень растворения частиц полимера в жидких и низкомолекулярных компонентах оказывает влияние на прочность пленок. При использовании в качестве связующего пластифицированного ПВХ разрушение всех структур приводит к повышению качества изделия, при производстве же ударопрочных пленок и листов, наоборот, наличие глобул желательно и даже необходимо. Пластикация исходной смеси осуществляется благодаря воздействию высоких напряжений сдвига на перерабатываемый материал. Диссипативный разогрев при пластикации усиливается подводом тепла от внешних нагревателей смесителей-пластикаторов: 1) вальцы; 2) скоростные смесители закрытого типа; 3) экструдеры.

Периодический процесс приготовления смеси на вальцах, применявшийся ранее, в настоящее время в большинстве случаев заменен непрерывным. В случае непрерывного метода приготовления смеси на вальцах со стороны, противоположной механизму регулирования межвалкового зазора, непрерывно снимается лента готовой композиции и подается на каландр. На вальцах устанавливается подрезное приспособление для дополнительной гомогенизации.

Система нагрева и регулирования температуры вальцов аналогична системе нагрева каландров. Привод вальцов состоит обычно из электродвигателя и редуктора.

Скоростные смесители закрытого типа состоят из смесительной камеры, внутри которой вращается один или два Z-образных ротора. Со смесительной камерой связана загрузочная шахта с пнев-

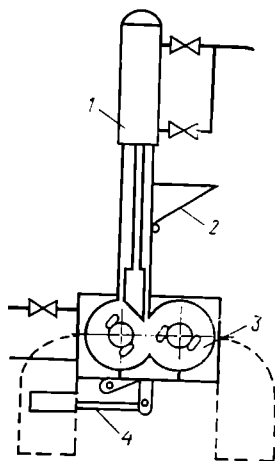


Рис. 8.19. Скоростной смеситель закрытого типа: 1 — пневмоцилиндр верхнего затвора; 2 — загрузочный бункер; 3 — смесительная камера с двумя роторами; 4 — нижний затвор (разгрузочный люк).

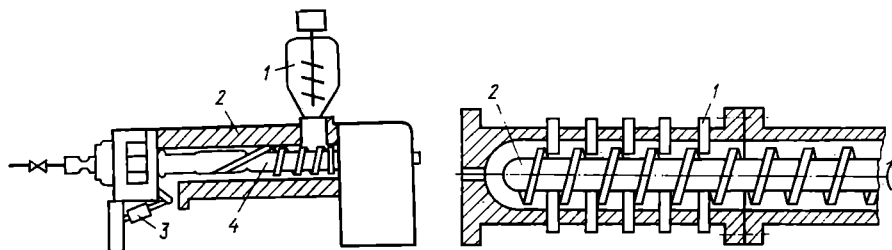


Рис. 8.20. Червячный смеситель непрерывного действия:

1 — загрузочный бункер с мешалкой; 2 — цилиндр; 3 — затвор; 4 — смесительный червяк.

Рис. 8.21. Червячный смеситель с перемешивающими штифтами:

1 — штифт; 2 — червяк с радиальными пазами.

матическим (в большинстве случаев) поршнем. Определенная доза исходного материала (10—50 л) загружается в смесительную камеру через загрузочную шахту. Пластикация осуществляется Z-образными роторами, частота вращения которых регулируется ступенчато от 50 до 150 об/мин при двух роторах и от 100 до 500 об/мин при одном роторе. Преимущество скоростных смесителей закрытого типа состоит в том, что в них можно перемешивать исходные компоненты смеси с различными технологическими свойствами: можно использовать грубые частицы, что важно при переработке отходов. Недостатком указанных смесителей является периодичность выгрузки. После относительно короткого времени смешения (1—3 мин) готовая смесь выгружается в виде глыбы или бесформенной массы через разгрузочный люк, который закрывается специальным затвором (рис. 8.19).

Многие смесители-пластикаторы работают по принципу экструзионных машин (рис. 8.20—8.23), которые с целью усиления диспергирующего воздействия снабжены различными дополнительными устройствами.

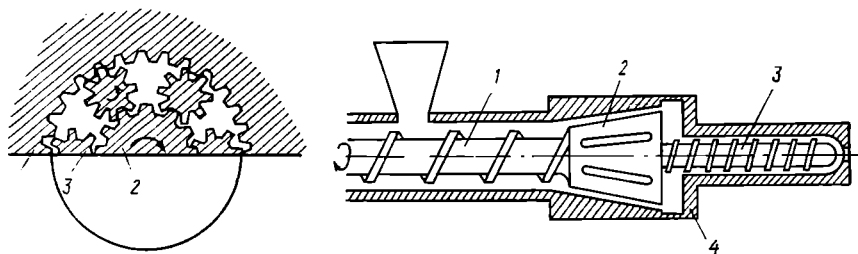


Рис. 8.22. Планетарный червячный смеситель:

1 — цилиндр с профильной нарезкой; 2 — центральный червяк; 3 — планетарный червяк.

Рис. 8.23. Экструзионный смеситель со смесительным конусом:

1 — питающий червяк; 2 — смесительный конус; 3 — выгрузной червяк; 4 — цилиндр.

8.9.3. Каландрование

Формование расплавов полимеров, охлаждение изделия и придание ему товарного вида осуществляется на каландрах, снабженных соответствующими дополнительными устройствами, входящими в состав каландровой линии.

В связи со значительной шириной пленки или листа (100—200 см) и большой производительностью (400—2000 кг/ч), а также из-за высокой вязкости расплавов полимеров требуется надежное исполнение каландров (особенно в отношении жесткости конструкции) при высокой точности межвалкового зазора. Это необходимо ввиду незначительной толщины изделия и относительно высокого допуска ($0,08 \div 0,8 \text{ мм} \pm 0,01 \div 0,03 \text{ мм}$).

На рис. 8.24 и 8.25 представлены принципиальные схемы применяемых каландров и конструктивные схемы валков каландров. Часто применяются четырехвалковые каландры, но встречаются также двух-, трех- и пятивалковые каландры.

Валки каландров, внутри которых по периферии расположены отверстия для циркуляции теплоносителя, изготавливаются из стали или серого чугуна. При использовании периферийных сверлений (отверстий) практически обеспечивается равномерное температурное поле, что весьма важно для получения равнотолщинных изделий. При использовании валков только с центральным отверстием для подвода теплоносителя температурное поле можно выравнивать установкой дополнительных наружных нагревателей (например, инфракрасных или индукционных).

Для достижения необходимой точности установки межвалковых зазоров с учетом распорных усилий и температуры применяются следующие специальные меры; 1) шлифовка валков в нагретом состоянии; 2) установка цапф валков в точно по-

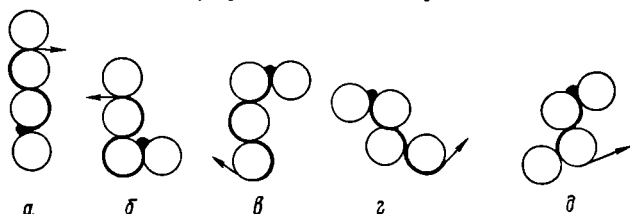


Рис. 8.24. Расположение валков в каландрах:

а — вертикальное; б — L-образное; в — Г-образное; г — Z-образное; д — S-образное.

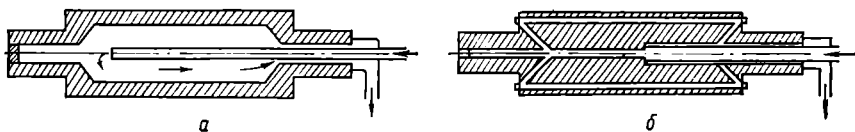


Рис. 8.25. Валки каландров:

а — с центральным каналом для подвода теплоносителя; б — с периферийными каналами для подвода теплоносителя.

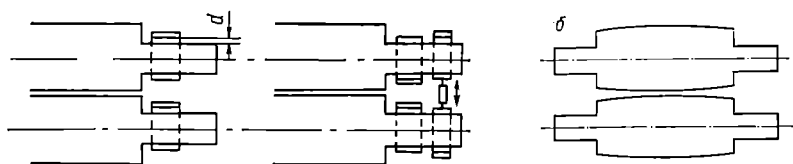


Рис. 8.26. Принципиальная схема предварительного нагружения валков с целью выравнивания подшипникового зазора d .

Рис. 8.27 Компенсация прогиба валков с помощью бомбировки:

a — прогиб цилиндрических валков; b — бомбировка валков.

добранных по допуску подшипниках качения или скольжения; 3) предварительное нагружение валков (рис. 8.26); 4) бомбировка валков (рис. 8.27); 5) перекося осей валков (рис. 8.28); 6) контризгиб (рис. 8.29).

Несмотря на эти мероприятия, пленки имеют разнотолщинность по ширине (за исключением случаев хорошей бомбировки валков при соответствующем подборе рецептуры смеси и температуры), так как изгиб валков каландров под действием распорного усилия и мероприятия по ликвидации его последствий не поддаются точному аналитическому описанию (рис. 8.30).

(Важное значение имеет привод каландров. Целесообразно каждый валок каландра, тянущие валки, охлаждающие валки, установки для тиснения и приемное устройство снабжать отдельными, независимыми друг от друга регулируемыми приводами. Современным решением этой проблемы является применение блока двигателей постоянного тока.

Каландрование производится при температуре наружной поверхности валков 430—470 К и окружной скорости валков 10—100 м/мин — в зависимости от толщины изделия и перерабатываемого материала. Нагрев (а при высоких скоростях и

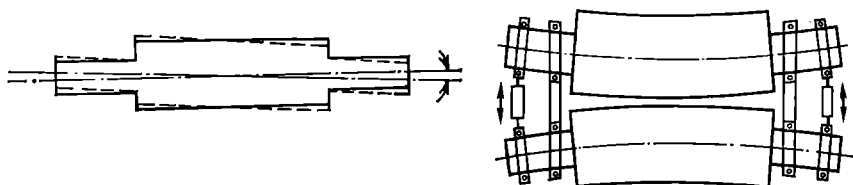
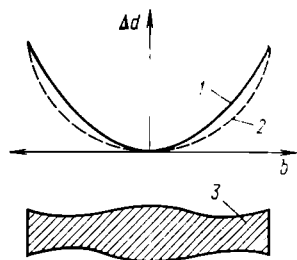


Рис. 8.28. Компенсация прогиба валков методом перекося осей валков.

Рис. 8.29. Компенсация прогиба валков методом контризгиба.

Рис. 8.30. Принципиальная схема возможных ошибок при компенсации прогиба валков (Δd — отклонение величины установленного межвалкового зазора, b — координата замера по длине валков):

1 — отклонение величины зазора без компенсации; 2 — скорректированная величина зазора; 3 — результирующий профиль сечения пленки.



охлаждение) должен осуществляться с высокой точностью с допуском по температуре ± 2 К. Это требование выполняется принудительной циркуляцией теплоносителя. В качестве теплоносителя преимущественно применяется горячая вода (или перегретая вода), но часто применяются также термостойкие масла. Разогрев до первоначальной установленной температуры (перед пуском линии) производится паром, электрическими нагревателями сопротивления, газовыми или масляными горелками. При этом, однако, следует учитывать необходимость независимого регулирования температуры каждого вала каландра и тянущих валков (рис. 8.31).

Принцип каландрования заключается в следующем. Пластицированная термопластичная масса в большинстве случаев непрерывно действующей транспортной лентой подается к каландру, равномерно распределяется по длине первого межвалкового зазора каландра, откуда подхватывается последующими валками и проходит через второй и третий межвалковые зазоры. Отформованная заготовка отбирается с последнего

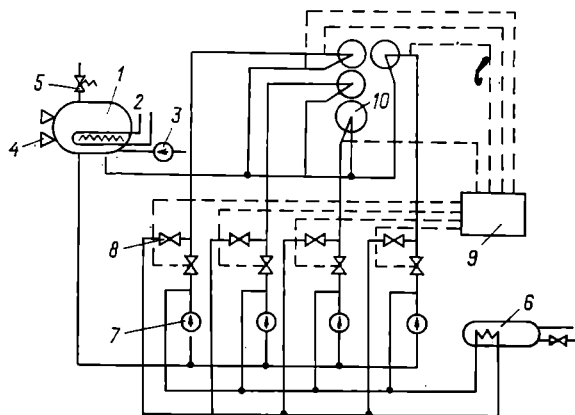


Рис. 8.31. Принципиальная схема нагрева валков каландров горячей водой:

1 — устройство для подогрева воды; 2 — нагревательный элемент; 3 — питающий насос; 4 — устройство для контроля степени заполнения; 5 — предохранительный клапан; 6 — устройство для охлаждения; 7 — циркуляционный насос; 8 — регулирующий клапан; 9 — регулятор температуры; 10 — каландр.

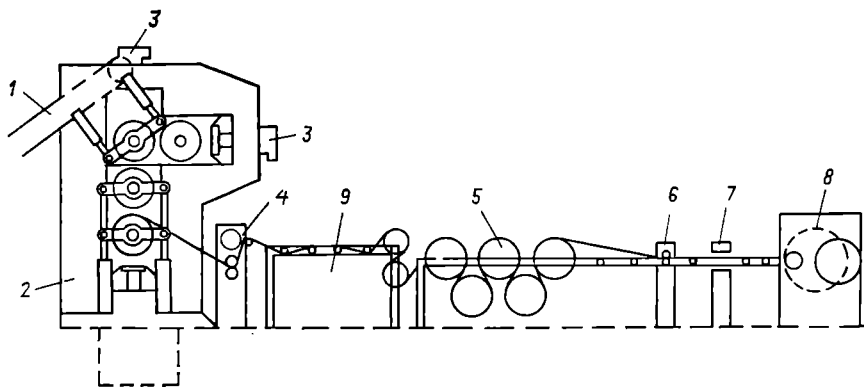
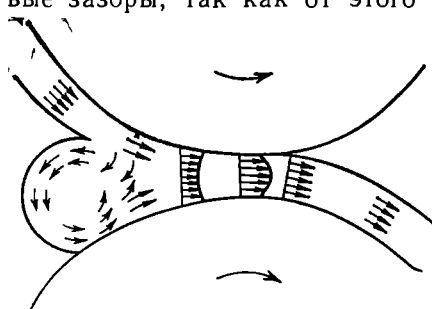


Рис. 8.32. Принципиальная схема каландровой линии:

1 — транспортерная лента для подачи пластифицированной массы; 2 — каландр; 3 — механизм регулирования межвалкового зазора; 4 — устройство для нанесения тиснения; 5 — охлаждающие барабаны; 6 — режущее устройство для образования продольных кромок; 7 — прибор для замера толщины изделия; 8 — приемное устройство; 9 — тянущее устройство.

валка (рис. 8.32). Отбор может производиться непосредственно гладильным устройством или установкой для нанесения тиснения, а также специальным рольгангом. Затем листы или пленки, проходя через ряд охлаждающих валков, подвергаются операции обрезания продольных кромок, сматываются в рулоны или режутся на отрезки определенного размера и штабелируются.

Регулирование толщины листа или пленки связано с регулированием последнего межвалкового зазора. Основанием для регулирования последнего межвалкового зазора являются сигналы, поступающие с контрольно-измерительных приборов, непрерывно фиксирующих толщину и площадь поверхности ленты материала. Эти приборы работают по различным принципам измерения — пневматическому, индуктивному, радиоактивному, емкостному. Процесс установки межвалкового зазора может быть проведен автоматически или ручным способом. При пуске или при значительном изменении последнего межвалкового зазора необходимо корректировать первый и второй межвалковые зазоры, так как от этого зависит запас материала перед каждым из перечисленных зазоров.



В расплаве полимера, находящемся перед каждым из межвалковых зазоров, происходит непрерывный массообмен (рис. 8.33). Количество

Рис. 8.33. Схема потока перерабатываемого материала в межвалковом зазоре.

материала, находящегося в межвалковом зазоре, уменьшается по мере удаления от середины вала к его краям, одновременно с этим сокращается и время пребывания перерабатываемого материала в межвалковом зазоре.

При отборе пленки или листа после выхода из межвалкового зазора происходит изменение поперечного сечения изделия, которое проявляется в его разбухании вследствие вязкоупругих свойств расплавов термопластов.

При каландровании листов и пленок необходимо, чтобы расплавы формируемой массы обладали относительно высокой эластичностью. Это необходимо для того, чтобы расстояние между отдельными комплектующими устройствами каландровой линии лента формируемого материала могла преодолеть без нарушения сплошности.

8.10. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЕНКИ НА КАЛАНДРАХ

Описанный выше способ получения листов и пленок каландрованием основан на нагреве перерабатываемого материала до температуры плавления полимера и называется поэтому высокотемпературным способом.

При переработке непластифицированного ПВХ возможно применение низкотемпературного способа, основанного на формировании пленок в области температур ниже температуры плавления полимера. Однако при этом для придания пленкам большей прочности требуется их последующее плавление. Недостатком низкотемпературного способа получения пленок каландрованием является перегрузка валков и необходимость последующей термообработки.

Последующая термообработка осуществляется на системе валков, которые разогревают пленку и придают ей глянец. Однако в этом случае определяющую роль играет не межвалковый зазор, а боковые поверхности, которые плотно обвиваются пленкой (рис. 8.34). Благодаря этому достигаются следующие технические эффекты: 1) возможность изготовления пленок таких толщин, которые нельзя изготовить методом горячего каландрования ($< 0,08$ мм); 2) увеличение площади поверхности производимой пленки; 3) повышение удельной прочности; 4) возможность изготовления термоусадочных пленок при соответствующем выборе температур.

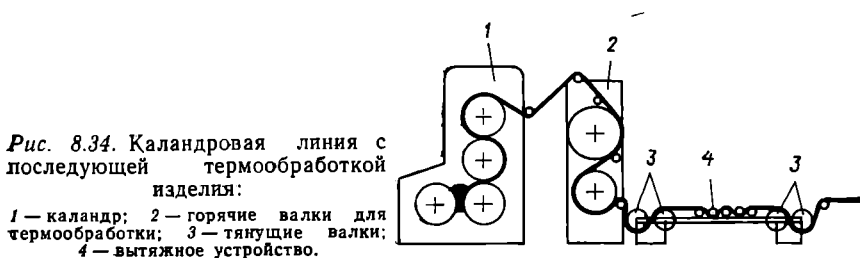


Рис. 8.34. Каландровая линия с последующей термообработкой изделия:

1 — каландр; 2 — горячие валки для термообработки; 3 — тянущие валки; 4 — вытяжное устройство.

При каландровании происходит продольная вытяжка пленок. Так, при переработке пластифицированного ПВХ линейная скорость отбора охлажденной пленки превышает окружную скорость последнего валка каландра на 30—100%, благодаря чему осуществляется дополнительная вытяжка пленки. Поэтому прочность на растяжение в продольном направлении на 10—20% выше прочности в поперечном направлении. С помощью специальных вытяжных устройств удается растянуть пленку до 500% от ее первоначальной длины.

На специальных устройствах разогретую горячим воздухом пленку можно растянуть как в поперечном, так и в продольном направлениях. Следствием этого является значительное увеличение ширины готовой пленки.

8.11. Нанесение полимерных покрытий на каландрах

В момент пленкообразования полимер на каландре находится в пластическом или эластическом состоянии, благодаря чему он не только обладает хорошей адгезией к материалу основы, но также (вследствие возможности заполнения пор) образует механическую связь с покрываемым материалом. Поэтому возможно нанесение с помощью каландров односторонних или двухсторонних покрытий. Нанесение двухсторонних и многослойных покрытий на исходный материал осуществляется многократным его пропуском через каландр.

Каландры для нанесения покрытий комплектуются следующими дополнительными устройствами: 1) барабаном с исходным материалом (текстиль, бумага), накопителем, расширительными и направляющими валками для подвода исходного материала к позиции нанесения покрытий; 2) барабанной сушилкой для предварительной сушки исходного материала; 3) тисильными валками.

Последние два приспособления во многих случаях могут отсутствовать. Возможные варианты нанесения покрытий на ленту исходного материала показаны на рис. 8.35—8.38. Если не предъявляются высокие требования к равномерности покрытия, то конструкция агрегата может быть упрощена. Это имеет место, когда применяются валковые агрегаты с двумя или тремя валками, в большинстве случаев нагреваемыми изнутри электронагревателями (см. рис. 8.36).

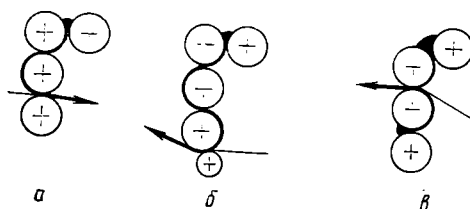


Рис. 8.35. Принципиальные схемы нанесения покрытий на каландрах:

а, б — одностороннего; в — двухстороннего.

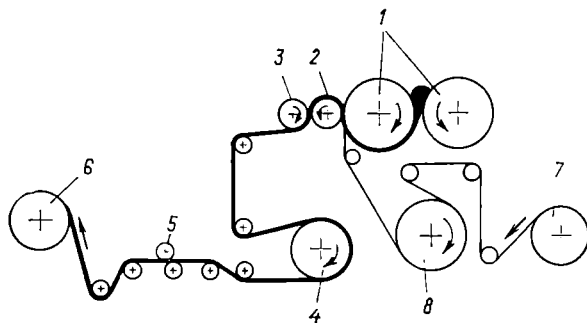


Рис. 8.36. Валковый агрегат для нанесения покрытий из расплавов полимеров:

1 — пластифицирующие вальцы; 2 — гуммированный тянущий валок; 3 — валок для нанесения тиснения; 4 — охлаждающий барабан; 5 — режущее устройство для образования продольных кромок; 6 — приемное устройство; 7 — размоточный барабан с исходным материалом; 8 — нагревательный барабан.

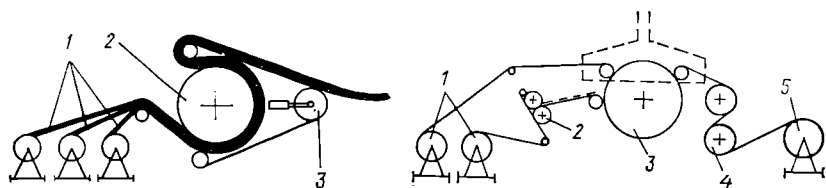


Рис. 8.37 Копировальный агрегат с ленточным прессом:

1 — исходный материал; 2 — горячий барабан; 3 — устройство для натяжения ленточного пресса.

Рис. 8.38. Агрегат для каширования мокрым способом:

1 — размоточные барабаны; 2 — промазочные вальцы; 3 — сушильный барабан; 4 — охлаждающие вальцы; 5 — приемное устройство.

8.12. Нанесение тиснений на пленки и слоистые материалы

При получении рельефного рисунка на внешней поверхности пленок и слоистых материалов используется свойство формовости полимера в термопластичном состоянии. Для нанесения тиснения на готовые плоские пленки и листы применяют специальный каландровый агрегат. Исходный материал через накопитель попадает на нагревательный барабан (с паровым или масляным нагревом) и затем, проходя через поле инфракрасного излучения, попадает на агрегат для нанесения тиснения.

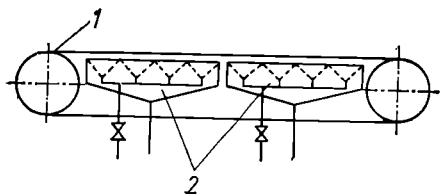


Рис. 8.39. Охлаждающее устройство:

1 — ленточный транспортер; 2 — вентиляционный кожух.

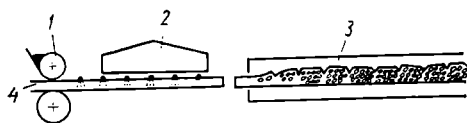


Рис. 8.40. Принципиальная схема химического способа нанесения тиснений:

1 — устройство для вдавливания частиц красителя, содержащих ингибиторы вспенивания; 2 — сушилка; 3 — устройство для вспенивания; 4 — лента исходного материала.

В качестве тиснильных валков применяются полые с гравированной внешней поверхностью стальные валки, которые охлаждаются или термостатируются. Лента материала прижимается к тиснильному валу гуммированным валком, который охлаждается водой. Между тиснильным валком и приемным барабаном находится станция охлаждения, которая чаще всего состоит из охлаждающих валков. При производстве изделий из негибких или малогибких материалов применяется охлаждающий транспортер и штабелеукладчик (рис. 8.39).

Возможна стыковка тиснильного агрегата с каландровой линией для получения листов и пленок. На качество тиснения влияет скорость движения ленты полимерной пленки или листа. Наиболее благоприятной для пластифицированного ПВХ является скорость движения ленты 15—30 м/мин.

Существуют и другие способы нанесения тиснений на пленки или слоистые материалы с полимерными покрытиями. Так, при применении тисненых бумаг на полимерном покрытии рельефно проявляется непосредственно тисненная поверхность бумаги. При использовании вспененных покрытий перед вспениванием в поверхность покрытий запрессовываются ингибиторы или активаторы процесса вспенивания; частицы их вдавливаются в полимер, и при последующем вспенивании в этих местах будут образовываться углубления — в точках, куда попали частицы ингибитора, — или бугорки — в точках, где находились частицы активатора (рис. 8.40).

ГЛАВА 9

Производство изделий из стеклопластиков

9.1. Особенности формования изделий из стеклопластиков

Армирование полимеров стеклянными или другими высокопрочными волокнами позволяет в значительной степени повысить прочностные и деформативные свойства этих материалов, увеличить их теплостойкость и изменить в нужном направлении другие показатели (например, диэлектрические свойства).

Прочностные и деформативные свойства стеклопластиков определяются не только соотношением полимера и волокна в

композиции, но и ориентацией последнего. По макроструктуре волокнистого наполнителя стеклопластики разделяются на три основных вида: а) изотропные материалы, характеризующиеся произвольным расположением армирующих волокон и равенством физико-механических показателей во всех направлениях; б) трансверсально-изотропные материалы, в которых волокно имеет преимущественно плоскостную ориентацию, и показатели материала практически равноценны по всем направлениям в плоскости расположения волокон; в) анизотропные материалы, для которых характерна строгая ориентация волокна в одном или в двух направлениях, в результате чего свойства композиции могут существенно отличаться по трем основным осям симметрии.

Исследованиями в области механики полимеров устанавливается с той или иной степенью точности взаимосвязь между структурными параметрами композиции (т. е. содержанием и ориентацией наполнителя) и ее физико-механическими характеристиками. Следовательно, для получения изделий с заданными свойствами должна быть установлена взаимосвязь между структурными параметрами композиции и параметрами технологического процесса производства изделий.

Все существующие методы формирования изделий из стеклопластиков можно разделить на две большие группы.

К первой группе относятся методы, практически мало отличающиеся от традиционных методов переработки пластмасс. Для этих методов характерно совместное движение связующего и волокнистого наполнителя в каналах и рабочих органах машины и полостях формующего инструмента. К таким методам относятся прессование, литье под давлением и экструзия композиций с коротковолокнистым наполнителем. Как правило, при этом получают материалы изотропного типа и метод подхода к решению технологических задач при переработке таких материалов мало отличается от обычного.

Ко второй группе относятся специфические методы формирования изделий из стеклопластиков, характеризующихся анизотропной или трансверсально-изотропной структурой. Особенностью этих методов является ограниченная подвижность наполнителя на стадии совмещения его со связующим, вследствие чего определяющей операцией является пропитка волокнистого наполнителя связующим. Другой особенностью процессов формирования этого типа является формирование макроструктуры волокнистого наполнителя в изделии с целью достижения заданных физико-механических показателей материала. Технологические приемы и методы формирования макроструктуры волокнистого наполнителя зависят как от вида наполнителя, так и от геометрической формы и размеров изделий.

Волокнистый наполнитель может использоваться в виде непрерывных нитей, волокон, жгутов, в виде рубленого волокна.

длиной до 100 мм и, наконец, в виде тканей, холстов и объемных заготовок будущих изделий.

Из стеклопластиков формуются изделия самых различных размеров и формы: трубопроводы и реакционная аппаратура, строительные панели и кровля, корпуса автомобилей и судов, самолетов и ракет и многие другие. Стеклопластики как конструкционный материал особенно пригодны для формования изделий, имеющих форму оболочек. Как уже отмечалось, содержание волокнистого наполнителя в композиции является одним из существенных факторов, от которых зависят свойства материала.

Объемное содержание волокнистого наполнителя V_c определяется следующим выражением:

$$V_c = G/(\rho\delta) \quad (9.1)$$

где G — масса волокна, приходящаяся на единицу поверхности изделия; ρ — плотность материала волокна; δ — толщина стенки изделия.

Качество материала в изделии существенно зависит от точности введения наполнителя и технологического и аппаратурного оформления процесса.

С наибольшей точностью толщина стенки изделия выдерживается в таких методах формования, где обе поверхности изделия оформляются в контакте с жесткой формой. Тогда воспроизводимость заданных значений V_c будет определяться точностью изготовления формы и системы ее замыкания, а также качеством сборки волокнистой заготовки на поверхности формы. Кроме того, при использовании рулонных наполнителей необходимо учитывать их возможное уплотнение в процессе драпировки на поверхностях двойной кривизны.

Пропитка волокнистого наполнителя при производстве изделий из стеклопластиков принципиально возможна на разных стадиях процесса; предварительная пропитка холстов, тканей, жгутов или нитей до контакта наполнителя с поверхностью формы; пропитка наполнителя всех видов при контакте их с поверхностью формы; наконец, пропитка наполнителя после контакта его с поверхностью формы, т. е. фактически после формирования макроструктуры наполнителя в изделии.

В зависимости от типа связующего, вида наполнителя, формы и размеров изделия, а также необходимой точности структурных параметров материала перечисленные варианты пропитки реализуются в различных методах формования.

9.2. Технологические свойства стекловолокнистых наполнителей и связующих

Роль стекловолокнистых наполнителей и связующих в стеклопластиках достаточно подробно исследована при оценке физико-механических свойств отвержденных композиций. Стекловолокнистый наполнитель является упрочняющим элементом и

воспринимает основные нагрузки при работе конструкции из стеклопластика. Роль связующего состоит в том, чтобы обеспечить совместную работу волокон наполнителя в процессе нагружения. На современном уровне производства к качеству изделий предъявляются повышенные требования, а серийность становится существенным фактором, влияющим на экономические показатели производства. В связи с этим детальное исследование сущности процессов формования необходимо для научно обоснованного выбора формирующего оборудования и параметров процесса формования.

Особое внимание уделяется технологическим свойствам исходных материалов: деформационным и фильтрационным характеристикам наполнителей и вязкостным свойствам связующих.

Практически для любого метода формования характерным является уплотнение наполнителя в направлении, перпендикулярном поверхности формы. Уплотнение может осуществляться как по всей поверхности формы одновременно, так и локально на отдельных ее участках, уплотняться наполнитель может как в сухом виде, так и после (или во время) пропитки.

Для рулонных наполнителей (холсты и ткани) установлена взаимосвязь между объемным содержанием наполнителя V_c и давлением q [211, 212]:

$$V_c = a \lg q + b \quad (9.2)$$

где a и b — экспериментальные коэффициенты, зависящие от вида наполнителя.

При использовании в качестве наполнителя стеклонитей или стекложгутов, укладываемых с натяжением непосредственно на выпуклую поверхность технологической оправки, величина давления (а следовательно, и степень уплотнения материала) определяется натяжением жгута и радиусом оправки. Однако деформативность структур, сформированных из жгута или нитей, целесообразно изучать на плоских образцах, намотанных с заданным шагом на плоскую рамку. Полученные образцы исследуются так, как и образцы из ткани или холста, а результаты исследований могут быть представлены в виде зависимости типа (9.2). Величина технологического натяжения должна рассчитываться в дальнейшем с учетом количества слоев, жесткости оправки и ее геометрии, шага и угла намотки.

При формировании изделий на основе холстов и тканей необходимо учитывать их драпировочные свойства, под которыми следует понимать способность стеклотканей и стеклохолстов укладываться на поверхность двойной кривизны без складок и существенных нарушений структуры. Драпировочные свойства таких наполнителей связаны с наличием в их структуре взаимноподвижных элементов. Изменение взаимного расположения элементов, т. е. внутрислойные деформации позволяют формировать оболочки двойной кривизны без стыков на-

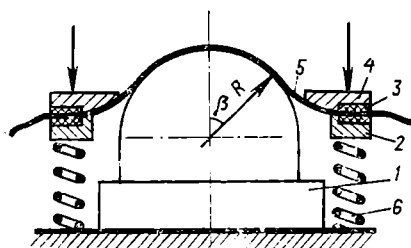


Рис. 9.1. Схема укладки (вытяжки) слоя стеклоткани на поверхности полусферической формы:

1 — форма; 2 — опорное кольцо; 3 — прокладка; 4 — нажимное кольцо; 5 — слой стеклоткани; 6 — пружинная опора.

полнителя. С другой стороны, внутрислойные деформации могут вызвать изменение содержания и ориентации наполнителя в стеклопластике и, следовательно, оказать влияние на его свойства.

Проведенные для стеклотканых наполнителей исследования показали, что большинство используемых стеклотканей могут укладываться на полусферическую поверхность без разрывов и складок. На рис. 9.1 представлена схема механизма укладки (вытяжки) слоя стеклоткани на поверхности полусферической формы.

Ниже представлены драпировочные свойства некоторых типов стеклотканей (предельная глубина вытяжки, определяемая по началу образования складок, характеризуется углом β_d ; приведена также величина α_d , условно названная драпировочным показателем, характеризующая угол между основой и утком после вытяжки плоского прямоугольного образца, вырезанного под углом 45° к основе ткани, под нагрузкой 1 Н на 1 см ширины образца):

Тип стеклоткани	β_d^0	α_d^0
АСТТ(6) — C ₂	89	32
АСТ(6) — C ₁	84	36
КТ-11	90	30
Т	78	38
Э	76	40

Как видно из приведенных данных, чем меньше драпировочный показатель, тем больше максимальная глубина вытяжки различных стеклотканей, что позволяет рекомендовать методику определения α_d для сравнительной оценки драпировочных свойств тканых наполнителей.

Как уже отмечалось, внутрислойные деформации могут являться причиной изменения плотности и ориентации стеклотканых наполнителей. Исследование драпировочных свойств стеклотканых наполнителей позволило установить, что внутрислойные деформации таких материалов носят шарнирный характер, т. е. узлы переплетения можно рассматривать как точки, вокруг которых происходит взаимный поворот нитей. При этом изме-

нение плотности структуры стекловолокнутого наполнителя может быть выражено соотношением

$$G = G_0 \frac{1}{\sin \alpha} \quad (9.3)$$

где G_0 и G — масса наполнителя, приходящаяся на единицу поверхности изделий в отсутствие и при наличии деформаций соответственно; α — угол между основой и утком в деформированном наполнителе.

Характер деформации при вытяжке слоя существенно различен по всей его поверхности. Наибольшие деформации имеют место на периферии формы по образующей, равноотстоящей от нитей основы и утка, проходящих через вершину формы. При вытяжке многослойного пакета с трансверсально-изотропной характеристикой в исходном виде (послойный сдвиг на угол 45°) плотность пакета по мере удаления от вершины формы изменяется согласно зависимости

$$G = G_0 \frac{\beta}{\sin \beta} \quad (9.4)$$

где β — сферическая координата формы (см. рис. 9.1).

Деформация некоторых типов мягких стеклохолстов может достигать 200% при одноосной вытяжке, что, очевидно, также позволяет предполагать у таких материалов хорошие драпировочные свойства. Однако установление единой зависимости уплотнения холста в результате внутрислойных деформаций представляет существенные трудности, так как методы изготовления холстов и их структура довольно разнообразны. Тем не менее, если к формируемым изделиям предъявляются жесткие технические требования по свойствам материала, то нельзя не учитывать изменения плотности наполнителя в процессе формования.

Операция пропитки волокнистого наполнителя связующим, как уже было отмечено, является определяющей при разработке технологического и аппаратного оформления процесса производства изделий из стеклопластиков. В связи с этим еще одним важным технологическим показателем стекловолокнутого наполнителя является его проницаемость — величина, характеризующая гидравлическое сопротивление волокнистой пористой среды при течении в ней связующего. Коэффициент проницаемости волокнистого наполнителя зависит от содержания последнего в единице объема и от его ориентации. Обычно коэффициент проницаемости находят экспериментально при исследовании процесса течения модельной ньютоновской жидкости в пористом образце, выполненном из данного вида наполнителя [213—214]. Для анизотропных структур определяется три коэффициента проницаемости: по каждой из трех основных осей симметрии в условиях одномерного потока.

Формула для определения коэффициента проницаемости в направлении движения жидкости в этом случае имеет вид

$$K = \frac{\eta QL}{B\delta\Delta p} \quad (9.5)$$

где η — динамическая вязкость модельной жидкости; Q — расход жидкости; Δp — перепад давления по длине образца; B , L , δ — ширина, длина и толщина пористого образца соответственно.

При определении коэффициентов проницаемости трансверсальноизотропных пористых сред [215] могут быть использованы образцы в виде плоского кольца толщиной δ , с внутренним и наружным диаметрами d и D соответственно.

В условиях двухмерного потока (радиальное течение жидкости) коэффициент проницаемости в плоскости кольца определяется выражением

$$K = \frac{\eta Q \ln(D/d)}{2\pi\delta\Delta p} \quad (9.6)$$

Использование образцов в виде кольца позволяет не только упростить и ускорить методику определения коэффициента проницаемости волокнистого наполнителя, но и одновременно определять его деформативность в широком диапазоне изменений объемного содержания посредством изменения толщины образца δ . Фиксируя в процессе эксперимента усилие сжатия, а также расход жидкости и давление ее нагнетания, можно согласно зависимости (9.6) рассчитать коэффициент проницаемости, а по известной площади кольца — давление уплотнения пакета (рис. 9.2).

Традиционные низковязкие связующие, используемые при производстве изделий из стеклопластиков, являются, как правило, ньютоновскими или близкими к ним жидкостями, что позволяет пренебречь влиянием скорости течения на их вязкостные свойства. Однако изучение этих свойств представляет значительный интерес при определении температурно-временных режимов формования изделий из стеклопластиков [216].

Наибольшее распространение в производстве изделий из стеклопластиков получили полиэфирные смолы. В качестве инициаторов отверждения этих смол применяются органические перекиси — вещества относительно нестойкие и легко распадающиеся на группы, активизирующие двойные связи полиэфира и

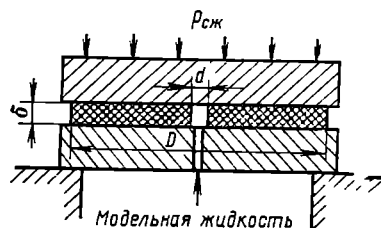


Рис. 9.2. Схема устройства для оценки компрессионных и фильтрационных свойств рулонных волокнистых наполнителей.

стирола. При холодном отверждении в состав полиэфирной композиции вводятся ускорители отверждения — органические вещества, активирующие распад инициатора при комнатной температуре. В качестве ускорителя применяется чаще всего нафтенат кобальта, иногда линолеат кобальта и нафтенат марганца. Весьма эффективен для отверждения полиэфирных композиций ванадиевый ускоритель.

Эпоксидные смолы, являющиеся продуктом взаимодействия эпихлоргидрина и дифенилолпропана, в зависимости от соотношения исходных компонентов могут при обычной температуре представлять собой жидкости самой различной вязкости.

Эпоксидные смолы в отличие от полиэфирных не обладают явно выраженным периодом жизнеспособности. После введения отвердителя, в качестве которого при комнатной температуре используется полиэтиленполиамин, практически сразу же начинается нарастание вязкости, что необходимо учитывать в технологическом процессе.

Кремнийорганические и фенолоформальдегидные смолы применяются главным образом для изготовления теплостойких материалов. Отверждение таких смол происходит при повышенной температуре. Модификация этих смол эпоксидными позволяет улучшить их физико-механические и некоторые технологические показатели.

9.3. Классификация методов формования

Методы изготовления изделий из стеклопластиков весьма разнообразны по аппаратурно-технологическому оформлению. Это обусловлено особенностями исходных материалов, формой и размерами изделий, а также требованиями, предъявляемыми к материалу изделий.

При классификации методов формования выделяются основные и вспомогательные процессы. К вспомогательным процессам относятся производство рулонных материалов (холсты, ленты, ткани) и объемных (тканых и нетканых) заготовок изделий, предварительная пропитка жгутов, лент рулонных волокнистых материалов, а также производство литьевых и прессовочных композиций.

Основные технологические процессы, или собственно методы формования могут быть разделены на методы открытого и закрытого типа. В первом случае одна из поверхностей изделия оформляется жесткой поверхностью формы, вторая же поверхность обычно остается свободной или формуется с помощью резиновой диафрагмы или других гибких элементов. К открытым способам относятся контактное формование, напыление, намотка и др.

При закрытом формовании обе поверхности изделия формуруются жесткими элементами формы. Отличительной особенностью методов закрытого формования является строгое соблю-

дение толщины стенки изделия и высокое качество обеих поверхностей. К таким методам относятся прессование, пропитка под давлением в замкнутой форме и протяжка.

(Вид армирующего наполнителя в значительной степени определяет выбор метода формования. Стеклоянное волокно, нити, жгуты, ленты используются при намотке; рубленое волокно — при напылении и предварительном формовании волокнистых заготовок изделий; холсты и ткани используются в основном при контактном формовании, прессовании и пропитке под давлением.)

Методы формования можно классифицировать, как уже указывалось, и по тому, на какой стадии производства осуществляется совмещение волокнистого наполнителя и связующего. При контактном формовании и напылении происходит одновременно формование макроструктуры волокнистого наполнителя в изделии и пропитка наполнителя связующим. В методах прессования, намотки, контактно-вакуумного формования используются предварительно пропитанные наполнители. В этом случае собственно операция формования связана только с формированием макроструктуры наполнителя и уплотнением композиции в форме. Для предварительной пропитки используются обычно спиртовые растворы фенольных смол, а также эпоксидные и полиэфирные связующие с длительной жизнеспособностью. В пропитанном материале смола содержится в сухом или в желеобразном виде. Содержание ее в композиции в зависимости от типа наполнителя может колебаться от 15 до 80%. Наконец, методы пропитки и «холодного» прессования характеризуются тем, что пропитка осуществляется непосредственно в форме после формирования макроструктуры волокнистого наполнителя в изделии или на завершающей стадии этой операции.

На практике используется еще ряд методов формования, являющихся модификацией отмеченных выше.

Давление формования в различных методах может варьироваться от 0 до 30 МПа.

Без давления осуществляется формование в методах контактного формования и напыления. Локальное уплотнение материала здесь производится при помощи рифленых прикатывающих валков, которые предназначены в основном для удаления пузырьков воздуха из формируемого материала.

К формованию с малым давлением (до 2,5 МПа) относятся методы намотки, центробежного литья и уплотнения при помощи резиновой диафрагмы (последний метод фактически можно рассматривать как модификацию контактного формования).

При пропитке наполнителя в замкнутой форме, а также при прессовании, на формирующем инструменте может развиваться давление до 7 МПа, значительная доля которого определяется необходимостью сжатия пакета наполнителя до нужной толщины.

Величина давления формования, а также серийность производства определяют выбор материала и технологию изготовления формующего инструмента [216]. При индивидуальном мелкосерийном производстве формующий инструмент изготавливается из дерева, фанеры, гипса, цемента, железобетона, различных полимерных композиций (в том числе из стеклопластиков), металлических сплавов. В ряде случаев используются композиции из воска, парафина, канифоли. Поверхность форм из пористых материалов (дерево, гипс) требует обязательной обработки воском или парафином. Кроме того, практически всегда перед формованием поверхности формы обрабатываются разделительными покрытиями, уменьшающими адгезию и облегчающими снятие готового изделия. Для получения разделительных покрытий применяются растворы, эмульсии, смазки. Плоские и разворачивающиеся в плоскость поверхности могут быть изолированы пленкой из целлофана, полиэтилена, поливинилового спирта и др. Гипсовые и деревянные формы обычно покрываются раствором ацетата целлюлозы. Растворы поливинилового спирта и полиизобутилена применяются для покрытия стеклопластиковых и металлических форм. Кремнийорганические покрытия и особенно покрытия, образующие после термообработки твердую пленку, обеспечивают многократный съем изделий.

При производстве изделий из стеклопластиков используется специальное оборудование, конструкция которого учитывает технологические особенности наполнителя и связующего, форму и размеры изделий, а также специфику метода формования.

9.4. Технологические параметры различных методов формования

Наиболее простым по аппаратурно-технологическому оформлению является метод контактного формования, который применяется для изготовления строительных конструкций, корпусов лодок, кузовов автомобилей и ряда других крупногабаритных изделий сложных контуров. При послойной укладке холста или ткани на поверхность формы осуществляется пропитка наполнителя связующим с помощью кисти или распылительного пистолета. Далее формируемое изделие прикатывается рифленным валиком для удаления воздуха и уплотнения материала. После уплотнения изделие можно покрыть пленкой и дополнительно прикатать валиком для разглаживания неровностей и удаления избытка связующего.

При контактном формовании практически исключена возможность регулирования содержания наполнителя в материале изделия, так как его уплотнение носит временный характер при локальном воздействии прикатывающего валика. Величина контактного давления зависит от площади поверхности контакта, определяемой размерами валика, а также от усилия опера-

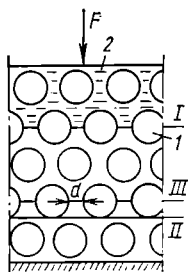


Рис. 9.3. Схема пропитки наполнителя связующим при временном локальном воздействии формирующего валика.

тора и достигает 0,15—0,2 МПа. В силу упругих свойств наполнителя после снятия давления толщина стенки формируемого изделия восстанавливается, а расширяющиеся поры под действием капиллярных сил заполняются связующим. Механизм пропитки в условиях локального воздействия прикатывающего валика показан на рис. 9.3.

При сжатии пучка волокон пористость его уменьшается, и в силу развиваемого давления фронт пропитки перемещается из положения I в положение II. После снятия давления вертикальный размер пучка восстанавливается, пористость его возрастает, но обратному течению связующего препятствуют капиллярные силы, определяемые минимальным расстоянием d между соседними волокнами. Расширяющиеся поры при этом заполняются связующим, поступающим через пропитанную область, а фронт пропитки при однократном локальном воздействии устанавливается в положении III. Конечно, полного восстановления макроструктуры наполнителя не происходит. Степень восстановления зависит от характера плетения ткани (или характера укладки нитей в холсте), от числа сжатий, от вязкости и жизнеспособности связующего и т. д. Установлено, что при контактном формовании стеклотекстолитов объемное содержание наполнителя составляет 30—35%, а стеклопластиков на основе стеклохолстов — 25—30%.

Недостатком контактного формования является значительная стоимость изделий, обусловленная большими затратами ручного труда и довольно длительным циклом изготовления. Достоинство этого метода состоит в его универсальности, т. е. возможности получения изделий практически любых форм и размеров.

Один из способов ускорения процесса контактного формования заключается в укладке на форму предварительно пропитанной сырой ткани. Пропитку ткани можно осуществлять на простейшем устройстве, состоящем из системы валков и пропиточной ванны. При этом количество связующего, наносимого на ткань, должно соответствовать его содержанию в изделии. Возможна пропитка ткани непосредственно в рулоне. Последний при этом помещается в ванну со связующим, находящуюся в автоклаве. При повышении давления воздух вытесняется из рулона. Содержание связующего в ткани будет определяться ее исходным уплотнением в рулоне.

(Метод напыления заключается в одновременном нанесении на поверхность формы рубленого волокна и связующего. Стекложгут проходит режущее устройство и напыляется на поверхность формы. В эту же зону формы, называемую фокусом, с

помощью распылительного устройства подается связующее. После нанесения заданного количества материала следует операция прикатки, аналогичная контактному формованию. Пропитка наполнителя связующим осуществляется как непосредственно при контакте этих материалов на поверхности формы, так и в результате воздействия рифленых валиков. Уплотнение, достигаемое в процессе формования, невелико. Объемное содержание волокнистого наполнителя в изделиях, полученных напылением, не превышает 28—30%, а получаемый материал характеризуется трансверсально-изотропными свойствами. Метод напыления более производителен, чем метод контактного формования, однако и он не лишен недостатков. В частности, затруднено изготовление изделий сложной формы, значительны потери стекловолокна (до 5%); стекловолокнистая пыль во взвешенном состоянии, а также пары связующего загрязняют воздух, ухудшая условия труда.

Изделия, полученные методом контактного формования, могут быть дополнительно уплотнены резиновой диафрагмой, прижимаемой к открытой поверхности изделия с помощью вакуума или давления.

Формование с помощью диафрагмы позволяет повысить объемное содержание волокнистого наполнителя в материале на 3—8% по сравнению с обычным контактным формованием. Взаимосвязь давления формования и степени уплотнения определяется деформативностью пропитанных материалов.

При использовании жестких тонкостенных оболочек (цугла), форма которых повторяет форму изделия и которые помещаются между изделием и диафрагмой, удается сглаживать отдельные неровности и улучшать качество поверхности.

Одна из разновидностей метода формования при помощи резиновой диафрагмы связана с производством емкостей и труб. Формование изделия осуществляется на эластичной надувной форме с последующим уплотнением сформированного изделия изнутри при повышении давления в форме. Внешняя поверхность изделия при этом может оформляться как в жесткой форме, так и без нее, если структура изделия содержит намотанную в окружном направлении арматуру, как это имеет место при намотке.

Производство труб и оболочек методом намотки позволяет создавать ориентированную структуру наполнителя в изделиях с учетом их формы и особенностей эксплуатации. Использование в качестве наполнителя жгутов, лент, нитей обеспечивает максимальную прочность изделий. Сущность «мокрого» метода намотки заключается в намотке непрерывного наполнителя, пропитанного в ванне связующим, на вращающуюся оправку. Ориентация наполнителя определяется соотношением скоростей вращения оправки и перемещения раскладчика. Содержание связующего при этом регулируется отжимными вальками. В отличие от «мокрого» метода намотки «сухой» метод состоит в

использовании предварительно пропитанного наполнителя. Для «мокрой» намотки используются в основном полиэфирные и эпоксидные смолы, для «сухой» — фенолоформальдегидные. «Сухая» намотка проводится обычно при повышенных температурах. Давление на оправку, а следовательно, и уплотнение наполнителя при намотке определяется его натяжением, геометрической формой изделия и жесткостью оправки. При формировании оболочек двойной кривизны намотка нитей должна проводиться по геодезическим линиям. Возможные отклонения при этом определяются коэффициентами трения стеклоарматуры, приведенными ниже.

Стеклонить сухая расшлифованная	
по стеклу	0,94
по алюминию	0,85
по стали	0,66
Стеклонить с парафиновым замасливателем	
по стали	0,26
по полиэтилену	0,23
Стеклонить, пропитанная эпоксидным связующим	
по стали	0,48
по стеклоарматуре	0,48

При намотке тонкостенных оболочек на жестких оправках технологическое натяжение практически сохраняется в намотанных структурах и, следовательно, определяет степень уплотнения наполнителя. Для толстостенных оболочек, особенно при формировании их на нежестких оправках [217], остаточное натяжение в структуре наполнителя может быть существенно ниже технологического; взаимосвязь между ними с достаточной точностью устанавливается зависимостью

$$F = \frac{F_0}{\sqrt{1 - \frac{E_c S_c}{E_\phi S_\phi}}} \quad (9.7)$$

где F_0 и F — технологическое и остаточное натяжение соответственно; а $E_c S_c$ и $E_\phi S_\phi$ — жесткость наматываемого стеклонаполнителя и жесткость находящегося под ним материала формирующей оправки соответственно.

Рекомендуемая величина технологического натяжения должна составлять 30—50% от показателя прочности материала наполнителя.

Методом намотки могут быть получены стеклопластики, содержащие до 90% (об.) наполнителя (однонаправленные материалы), прочность которых может достигать 3000 МПа.

Методы закрытого формования стеклопластиков обеспечивают наиболее высокую воспроизводимость структурных и геометрических параметров изделий.

Метод прессования в зависимости от способа пропитки имеет две разновидности: прессование сухих, предварительно пропитанных холстов и тканей и прессование с пропиткой наполнителя непосредственно в форме.

Рис. 9.4. Схема инъекционного прессования.

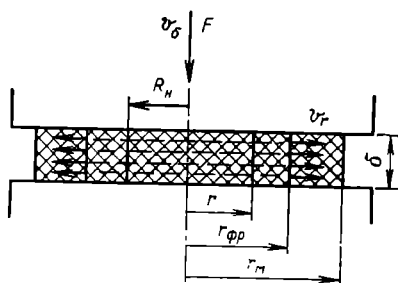
В первом случае холсты и ткани для улучшения их драпировочных свойств могут обрабатываться небольшими количествами растворителя или предварительно формироваться при повышенных температурах с помощью эластичной диафрагмы в виде элементов будущего изделия. Собственно процесс прессования при этом заключается в уплотнении пропитанного материала и отверждении связующего.

Непосредственно в процессе смыкания формы осуществляется пропитка наполнителя при «холодном» прессовании полиэфирных стеклопластиков. В матрицу укладывают требуемое число слоев наполнителя и на центральную часть полученной заготовки наливают определенное количество связующего. Связующее под давлением пуансона распределяется по всей форме, пропитывая наполнитель. Излишки наполнителя по периметру изделия отрезаются пресс-кантами при смыкании пресс-формы, а избытки связующего выдавливаются из полости формы через зазор между пресс-кантами.

При производстве изделий сложных контуров используются предварительно отформованные объемные стекловолоконные заготовки, получаемые осаждением рубленого стекловолокна на перфорированные формы под вакуумом. Чтобы полученная заготовка не рассыпалась, к напыляемому стекловолокну добавляют небольшое количество жидкого или порошкообразного связующего, которое в процессе сушки заготовки склеивает стекловолокна между собой. Объемное содержание волокна в таких заготовках составляет обычно 10—12%, а их уплотнение при последующем прессовании обычно достигает трехкратной величины. При прессовании стеклотекстолитов объемное содержание волокна может достигать 70%.

Усилие, необходимое для смыкания формы в процессе прессования, определяется не только степенью уплотнения пропитанного наполнителя, но и тем давлением, которое развивается в связующем при его течении в пористой среде.

Теоретические закономерности пропитки волокнистого наполнителя могут быть сформулированы на основании законов фильтрации при допущении, что жидкость полностью вытесняет воздух из заготовки и что связующее представляет собой несжимаемую ньютоновскую жидкость, при течении которой силы вязкости значительно превосходят силы инерции. При смыкании полуформ в процессе «холодного» прессования связующее пропитывает центральную часть неуплотненной заготовки, а затем движется к периферии формы. Именно эта стадия являет-



ся определяющей для установления взаимосвязей между параметрами технологического процесса и формирующего оборудования [218].

На рис. 9.4. представлена схема прессования плоского однородного по структуре диска радиуса r_m , конечная толщина которого δ_m при конечном содержании наполнителя V_c .

Пусть F — усилие, с которым сжимаются полуформы, а v_δ — скорость смыкания.

Очевидно, что величина F определяется как сумма усилия, необходимого для сжатия заготовки $F_{сж}$, и усилия нагнетания F_n , вызываемого давлением жидкости, обусловленным ее движением в пористой среде:

$$F = F_{сж} + F_n \quad (9.8)$$

За исходный радиус фронта пропитки примем некоторую величину R_0 , соответствующую пропитке заданным количеством связующего несжатого пакета толщиной δ_0 и пористостью m_0 . Пористость пакета определяется как $1 - V_{c0}$, где V_{c0} — содержание наполнителя при δ_0 . Тогда с учетом принятых допущений

$$R_0 = r_m \sqrt{\frac{m_m (1 - m_0)}{m_0 (1 - m_m)}} \quad (9.9)$$

где $m_m = 1 - V_c$ — пористость при толщине δ_m .

Существенной для дальнейшего рассмотрения является проницаемость пористой среды, которая, как было показано раньше, определяется как функция ее пористости, т. е.

$$K = f(m)$$

Уравнение движения, характеризующее скорость течения жидкости в любом месте пропитанной области, имеет вид:

$$v = - \frac{K}{\eta} \frac{dp}{dr} \quad (9.10)$$

где K — коэффициент проницаемости среды; η — динамическая вязкость связующего; dp/dr — градиент давления в направлении движения.

Уравнения неразрывности потока могут быть представлены в виде

$$v_\delta r = 2m\delta v; \quad v/r = v_r/r_{фр} \quad (9.11)$$

где $r_{фр}$ — текущий радиус фронта пропитки; v_r — скорость движения фронта; v_δ — скорость смыкания плит.

При постоянной скорости смыкания $v_\delta = \text{const}$ давление, развиваемое в жидкости внутри пропитанной области, определяется выражением

$$p = \frac{v_\delta \eta}{4\delta m K} (r_{фр}^2 - r^2) \quad (9.12)$$

а составная часть усилия смыкания, необходимая для движения жидкости при $r_{\text{фр}} = r_m$, т. е. в конце процесса, возрастет до величины

$$F_n = \frac{\pi v_0 \eta r_m^4}{8 \delta_m m_m K_m} \quad (9.13)$$

Выражение для оценки времени пропитки при $v_0 = \text{const}$ может быть представлено в виде

$$t = \frac{\delta_m m_m}{v_0} \left(\frac{r_m^2}{R_0^2} - 1 \right) \quad (9.14)$$

В случае постоянного усилия смыкания ($F = \text{const}$) величина F_n (а следовательно, гидравлическое давление в полости формы) не зависит от проницаемости среды и будет определяться только разностью $F - F_{\text{сж}}$, где $F_{\text{сж}}$ характеризует степень уплотнения пакета. Очевидно, что максимальное уплотнение материала в конечном итоге определяется только значением F .

Время пропитки при этом определяется как

$$t = \frac{\eta}{4 r_m^2} \int_{R_0}^{r_m} \frac{r^3 dr}{K \left(\frac{E}{\pi r_m^2} - q \right)} \quad (9.15)$$

где K и q являются переменными в процессе уплотнения величинами, зависящими от $r_{\text{фр}}$.

Метод пропитки под давлением в замкнутой форме в отличие от «холодного» прессования заключается в следующем. Непропитанный сухой наполнитель укладывается на пуансон, после чего матрица и пуансон смыкаются, полость формы герметизируется, и связующее под давлением нагнетается в форму, пропитывая наполнитель. Обычно давление нагнетания составляет 0,3—0,5 МПа, но может достигать и 2—2,5 МПа. Регулируя перепад давления в форме, можно изменять скорость движения фронта пропитки, что оказывает существенное влияние на ее качество. Время пропитки при ограниченном времени жизнеспособности связующего должно быть меньше последнего. Этот показатель является одним из важнейших параметров и зависит от формы и размеров изделия, плотности и ориентации наполнителя и вязкости связующего. Кроме того, имеет значение и система расположения источников питания и стока связующего. Колебание времени пропитки при выпуске серии одинаковых изделий может определяться отклонением режима давлений, изменением вязкости связующего или отклонениями структурных параметров заготовки, а также точностью смыкания полуформ.

При использовании тканых наполнителей объемное содержание стекловолокна в материале изделий может достигать 45—48%. Так же, как и при пропитке наполнителя в условиях «холодного» прессования, для метода пропитки наполнителя в

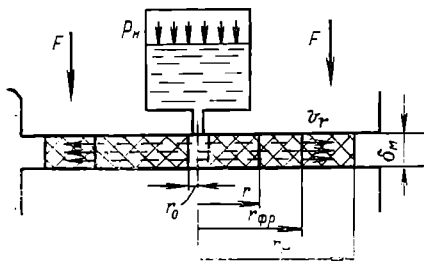


Рис. 9.5. Схема инъекционного формования.

замкнутой форме устанавливается взаимосвязь технологических параметров процесса и конструктивных параметров оборудования.

Схема процесса пропитки при формировании диска с конечными характеристиками, указанными на рис. 9.4., представлена на рис. 9.5. В отличие от предыдущей схемы в центре диска предусмотрено небольшое отверстие радиуса r_0 , которое связано с источником связующего, нагнетаемого под давлением p_n . Тогда усилие, необходимое для сжатия полуформ до размера δ_m , будет определяться, как и ранее, деформативностью наполнителя и давлением связующего в полости формы.

Уравнение неразрывности в этом случае имеет вид:

$$v_r r_{\phi p} = v r \quad (9.16)$$

Решение уравнения движения с учетом (9.16) позволяет определить время пропитки:

$$t = \frac{\eta r_0^2}{K p_n} \left[\left(2 \ln \frac{r_m}{r_0} - 1 \right) \frac{r_m^2}{r_0^2} + 1 \right] \quad (9.17)$$

Поле давлений внутри пропитанной области определяется соотношением

$$p = p_n \frac{\ln(r_{\phi p}/r)}{\ln(r_{\phi p}/r_0)} \quad (9.18)$$

Составляющая усилия смыкания, которая появляется в результате давления жидкости, имеет вид

$$F_n = p_n \frac{\pi}{2} \frac{r_m^2 - r_0^2}{\ln(r_m/r_0)} \quad (9.19)$$

При производстве методом пропитки под давлением крупногабаритных изделий сложной формы с переменными геометрическими и структурными параметрами стенки для расчета процессов пропитки целесообразно применять численные методы расчета на вычислительных машинах.

Для осесимметричных оболочек с произвольной образующей (рис. 9.6) структурные и геометрические характеристики могут быть заданы в виде

$$\begin{aligned} r &= r_0 f_r(x); & \delta &= \delta_0 f_\delta(x) \\ m &= m_0 f_m(x); & K &= K_0 f_K(x) \end{aligned} \quad (9.20)$$

где $x = S/S^*$ (здесь S — координата точки на образующей срединной поверхности оболочки, а S^* — некоторая фиксированная величина, например S_0).

Тогда выражения для скорости движения фронта и времени пропитки при постоянном перепаде давления могут быть записаны в виде

$$v_{\text{фр}} = \frac{\Delta p \cdot K_0}{\eta S^*} \psi(x) \quad (9.21)$$

$$t = \frac{\eta \cdot (S^*)^2}{\Delta p \cdot K_0} \int_{x_0}^x \frac{dx}{\psi(x)} \quad (9.22)$$

$$\frac{1}{\psi(x)} = f_r(x) \cdot f_\delta(x) \cdot f_m(x) \int_{x_0}^x \frac{dx}{f_r \cdot f_\delta(x) \cdot f_m(x) \cdot f_k(x)} \quad (9.23)$$

а $\psi(x)$ — безразмерная функция, характеризующая геометрические и структурные параметры заготовки, а также схему расположения источника и стока связующего. Связывая в любой момент времени действующий перепад давлений и скорость движения фронта, функция $\psi(x)$ позволяет при заданном законе изменения скорости пропитки $v_{\text{фр}}$ при некоторой исходной скорости v_0

$$v_{\text{фр}} = v_0 f_v(x)$$

получить формулу для регулирования перепада давления по длине образующей [214]:

$$\Delta p = \frac{v_0 \eta S^*}{K_0} \frac{f_v(x)}{\psi(x)} \quad (9.24)$$

В этом случае время пропитки определяется как

$$t = \frac{1}{v_0} \int_{x_0}^x \frac{dx}{f_v(x)} \quad (9.25)$$

Метод пропитки под давлением может быть составной частью «холодного» прессования. Тогда на первой стадии процесса при постоянном расстоянии между полуформами проводится частичная пропитка рыхлого пакета в области, прилегающей к источнику нагнетания связующего, а затем при дожиме происходит окончательная пропитка и формование изделия.

Трубы, профили, листы могут быть изготовлены методом протяжки. Стекложгуты после пропитки в ванне со связующим проходят через формующее устройство и далее протягиваются тянущими валками через термокамеру. Однонаправленные стержни, трубы, профили характеризуются очень высокой прочностью, так как содержат до 90% (об.) волокнистого наполнителя. Для увеличения прочности в поперечном направлении иногда перед формующим устройством на жгуты напыляется мелкодисперсное рубленое волокно. Расчет необходимого усилия на тянущих валках обычно проводится с учетом уплотне-

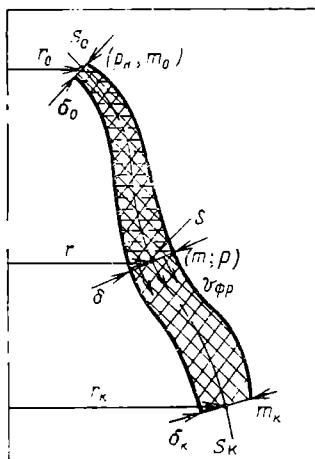


Рис. 9.6. Схема течения жидкости в пористой осесимметричной заготовке.

ния материала и сил трения между материалом и формирующим инструментом.

При непрерывном производстве листовых материалов пропитка холстов и тканей может осуществляться посредством подачи связующего через щелевой питатель или в пропиточной ванне. Перемещение листа осуществляется транспортерами, уплотнение — с помощью формирующих валков. Обе поверхности формируемого листа изолируются полиэтиленовой или целлофановой пленкой. Тянувшее усилие определяется

в значительной степени уплотнением волокнистого наполнителя на формирующих валках. Скорость протяжки зависит от скорости пропитки наполнителя.

Таким образом, при формировании изделий из стеклопластиков всегда должны рассматриваться две задачи: формирование макроструктуры волокнистого наполнителя в изделии и совмещение наполнителя со связующим. Необходимым условием решения этих задач является установление взаимосвязей между технологическими свойствами исходных материалов, технологическими параметрами процесса, геометрической формой изделий и параметрами формирующего оборудования.

ГЛАВА 10

Формование изделий методом литья смол

Формование изделий литьем смол является одним из самых универсальных методов переработки полимеров. Этим методом можно получать изделия из форполимеров и полимеров. Он применяется для получения изделий из следующих исходных материалов: а) отверждающихся смол, таких, например, как эпоксидные смолы, ненасыщенные полиэферы, полиуретаны; б) желеобразных паст из пластифицированного ПВХ и других полимеров; в) полимеризующихся мономеров (таких, например, как стиролы, акрилаты и др.); г) мономеров, способных к поликонденсации (капролактамов и т. д.); д) отходов производства целлюлозы (например, ксантогенатов целлюлозы); е) растворов полимеров (например, нитратов целлюлозы).

Изделия из указанных исходных полуфабрикатов можно получать литьем (заливкой) оформляющей полости формующего инструмента; поливом непрерывно движущейся транспортной ленты (получение пленок методом полива) и другими способами. Наибольшее распространение получил метод формования изделий литьем смол. Часто при переработке пластмасс различными методами практикуется изготовление модельных образцов для отыскания оптимальной геометрии будущего изделия с минимальными затратами на его изготовление. При этом в большинстве случаев используют способ литья смол. Однако этот способ применяется и как самостоятельный метод переработки для получения широкого ассортимента изделий.

Широкое применение при использовании этого метода находят эпоксидные смолы; это объясняется следующими причинами: а) отверждение эпоксидных смол осуществляется без выделения побочных продуктов, в связи с чем их переработка может производиться без приложения давления; б) достаточно высокие скорости реакции дают возможность формировать и отверждать эпоксидные смолы при комнатной или умеренно повышенной температуре; в) на процесс отверждения и свойства отформованных изделий можно воздействовать типом отвердителя, модифицирующими добавками, наполнителем, условиями переработки и т. д.; г) относительно низкая вязкость эпоксидных смол позволяет перерабатывать их без давления; д) усадка эпоксидных смол при отверждении незначительна; е) литьем эпоксидных смол можно легко получать армированные изделия.

Формование изделий литьем смол (особенно эпоксидных) в отличие от других, высокопроизводительных методов переработки (например, литья под давлением), не требует больших затрат на оборудование и формующие инструменты и может осуществляться рабочими невысокой квалификации. Кроме того, по сравнению с машинными методами переработки, указанный способ, несмотря на большую затрату времени (продолжительное время цикла), экономичен при единичном и мелкосерийном производстве. При соответствующем техническом оснащении оборудования и его автоматизации этот способ производства изделий может применяться и при массовом (крупносерийном) производстве.

Последующие разделы посвящены методам формования изделий из эпоксидных смол. Однако основные положения могут быть использованы и при формовании изделий из других смол.

10.1. Оборудование для формования изделий из смол

Преимущества технологии литья изделий из смол и особенности свойств получаемых изделий позволяют применять этот способ как при мелкосерийном, так и при крупносерийном производствах с использованием сравнительно дешевых и простых

Рис. 10.1. Аппараты для литья изделий из смол:

а — аппарат для подготовки смол (1 — термостатируемый аппарат с мешалкой; 2 — вакуумная линия; 3 — мешалка; 4 — термометр для замера температуры; 5 — перемешиваемая среда); *б* — аппарат для заливки (1 — термостатируемый аппарат; 2 — литейная емкость с краном; 3 — вакуумная линия; 4 — литейная форма).

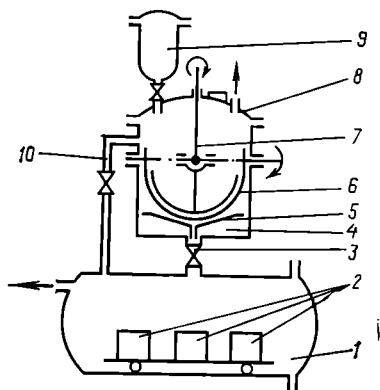
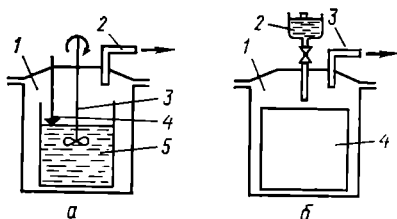
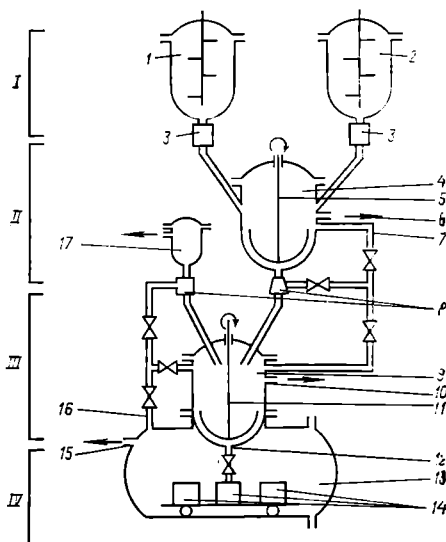


Рис. 10.3. Многоступенчатый агрегат для подготовки и литья смол:

I — емкость для смолы; *II* — емкость для наполнителя; *III* — дозаторы; *IV* — аппарат для подготовки смеси смолы с наполнителем; *V* — мешалка; *VI*, *IX*, *XII* — вакуумные линии; *III*, *VI* — сливной патрубков с вентилем; *III* — дозаторы; *IV* — аппарат для окончательной подготовки композиции; *VII* — выгрузной патрубков; *VIII* — литейной котел; *IX* — литейные формы; *X* — емкость для отвердителя; *XI* — дозирование исходных компонентов смеси; *XII* — смешение смолы с наполнителем; *XIII* — введение отвердителя в смесь; *XIV* — заливка форм.

Рис. 10.2. Агрегат для подготовки и литья смол:

I — литейной котел; *II* — литейные формы; *III* — выгрузной люк; *IV* — аппарат для подготовки литейной композиции; *V* — воронка; *VI* — опрокидываемая емкость; *VII* — мешалка; *VIII* — крышка с люками (смотровым, вакуумирования, загрузки компонентов); *IX* — вакуумный затвор; *X* — сливная линия.



агрегатов. Серийность производства и конфигурация изделий определяются способом литья, степенью отверждения материала в изделиях и применяемым оборудованием.

При применении способа литья смол в лабораторных условиях используются следующие приспособления: лабораторные ложки, шпатели, стержни для отбора компонентов из емкостей для их хранения, сосуды для смешения, весы и мерные сосуды для дозирования.

При мелкосерийном производстве изделий из смол применяются термостатируемые емкости для хранения и отбора компонентов, весы или дозирующие устройства, смесители, вакуумируемый сосуд (рис. 10.1), печи для отверждения.

При крупносерийном производстве изделий методом литья смол применяются агрегаты, в которых все процессы, начиная от загрузки и кончая получением готовых изделий различных конфигураций, полностью автоматизированы (рис. 10.2 и 10.3).

10.2. Формующие инструменты, применяемые при производстве изделий из смол

Формующие инструменты изготавливают из различных материалов. Выбор конкретного материала зависит от: а) серийности производства изделий из смол; б) габаритных размеров и сложности конструкций изделий; в) температуры отверждения или теплового эффекта реакции отверждения; г) области применения формующих инструментов.

В связи с этим к материалам для изготовления форм для литья изделий из смол предъявляют следующие требования: а) износостойкость; б) обеспечение стабильности размеров формующего инструмента; в) обеспечение хорошего качества формующей поверхности; д) теплостойкость; е) хорошая теплопроводность; ж) низкая себестоимость. Выбор материала зависит также от конструкции формующего инструмента: откры-

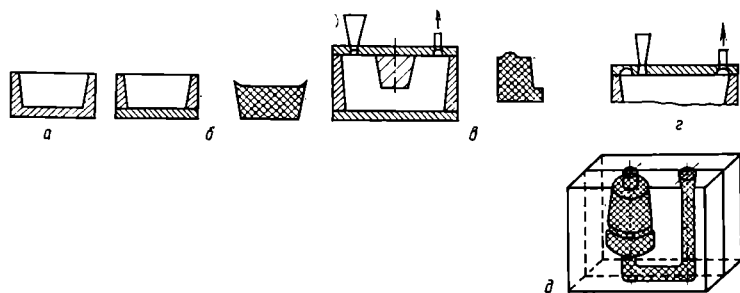


Рис. 10.4. Конструкции литьевых форм:

а — открытая форма монолитная; б — открытая форма из двух частей и пример последующей обработки изделия, полученного в такой форме; в — форма закрытого типа с загрузочной воронкой и вкладышем и пример последующей обработки изделия, полученного в такой форме; г — форма закрытого типа с каналом для окантовки; д — форма закрытого типа для литья «снизу вверх».

того или закрытого типов (рис. 10.4), цельной или разборной.

С учетом перечисленных факторов для изготовления формующих инструментов применяются следующие материалы: а) металлы — сталь, алюминий, свинец, латунь; б) полимерные материалы, например, эпоксидные смолы, полиэтилены, силиконовые (кремнийорганические) каучуки и др.; в) гипс; г) дерево.

В соответствии с выбранным материалом применяются различные способы изготовления формующих инструментов; а) токарная или фрезерная обработка (из металлов и дерева); б) сборка из полуфабрикатов (из металлов); в) холодная штамповка (из металлов); г) литье (сплавы алюминия); д) гальванопластика (никель); е) формование с помощью моделей (эпоксидные смолы, силиконовые каучуки); ж) раздув заготовки (полиэтилены). Применяются и другие способы изготовления форм.

С выбором материала для изготовления формующих инструментов неразрывно связаны и некоторые специфические проблемы, которые необходимо учитывать. К ним относятся: а) необходимость полировки и твердого хромирования формующей поверхности стальных форм; б) необходимость заделки пор в формах из гипса, дерева и алюминия.

Специальные марки эпоксидных смол и силиконовых каучуков находят широкое применение для изготовления формующих инструментов. Сама технология изготовления формующих инструментов из указанных материалов уже представляет способ получения изделий методом литья смол. Этот способ изготовления форм является самым дешевым и высокоэффективным даже при мелкосерийном изготовлении. Оба указанных материала проявляют высокую стойкость к различным химическим веществам и к тепловым воздействиям и имеют незначительную усадку. Кроме того, силиконовые каучуки благодаря эластичности и антиадгезионным свойствам хорошо извлекаются из оформляющих полостей и не требуют смазки.

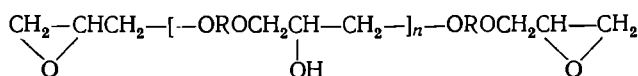
10.3. Технология формования изделий из эпоксидных смол

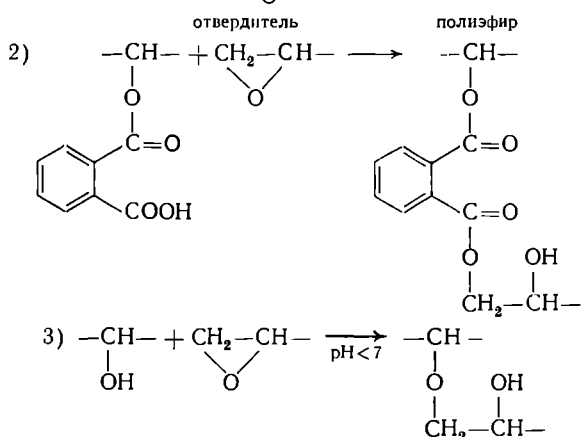
В состав эпоксидных смол входят эпоксидные группы —CH—CH₂, которые обладают высокой реакционной способ-



ностью, благодаря чему осуществляется процесс отверждения.

Эпоксидные смолы получают взаимодействием эпихлоргидрина с многоатомными фенолами (например, дифенилпропаном). В результате получается продукт общей формулы

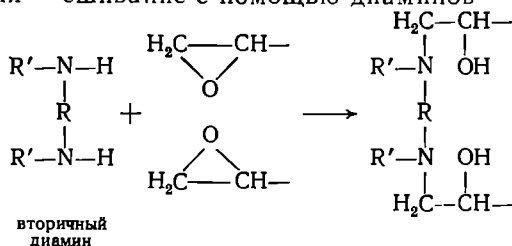


$$1) \text{---CH---} + \text{C}_6\text{H}_4 \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{O} \end{array} \longrightarrow \text{C}_6\text{H}_4 \begin{array}{c} \text{---CH---} \\ | \\ \text{O} \\ | \\ \text{C=O} \\ | \\ \text{COOH} \end{array}$$


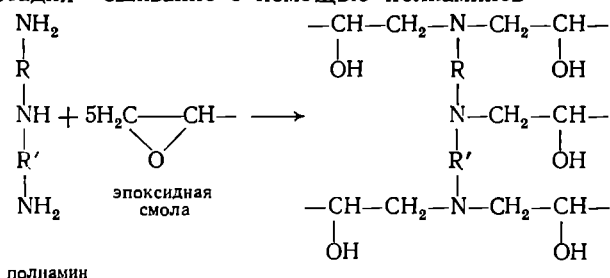
При применении аминов реакции отверждения протекают по следующему механизму.

$$\begin{array}{l} \text{а) } \text{R}-\text{NH}_2 + \text{H}_2\text{C}-\underset{\text{O}}{\text{CH}}- \longrightarrow \text{R}-\text{NH}-\text{CH}_2-\underset{\text{OH}}{\text{CH}}- \\ \text{эпоксидная смола} \qquad \qquad \qquad \text{взрорчный амин} \\ \text{б) } \text{R}-\underset{\text{R}'}{\text{NH}} + \text{H}_2\text{C}-\underset{\text{O}}{\text{CH}}- \longrightarrow \text{R}-\underset{\text{R}'}{\text{N}}-\text{CH}_2-\underset{\text{OH}}{\text{CH}}- \\ \text{вторичный амин} \qquad \qquad \qquad \text{эпоксидная смола} \qquad \qquad \qquad \text{третичный амин} \end{array}$$

Вторая стадия — сшивание с помощью диаминов



Третья—стадия—сшивание с помощью полиаминов



Смолы и отвердители берутся (дозировются) в стехиометрическом соотношении, которое фиксируется в технологической карте. Отклонение от дозирования ведет к изменению свойств готовых изделий. Целенаправленное варьирование соотношения компонентов может быть использовано для модификации свойств. Модификацию свойств, кроме того, можно осуществить применением других отвердителей (например, наполнителей).

Процесс отверждения может быть ускорен за счет введения ускорителей. Отверждение с помощью ангидридов протекает медленнее и с несколько меньшим тепловым эффектом, чем отверждение с применением аминов, но оно может быть ускорено введением ускорителей и проведением процесса при повышенной температуре (горячее отверждение). Отверждение с применением аминов может быть проведено уже при комнатной температуре (холодное отверждение), но может быть ускорено как повышением температуры (теплое или горячее отверждение), так и применением ускорителей.

На процесс отверждения (скорость реакции, тепловыделение) можно целенаправленно воздействовать добавлением различных отвердителей к одной и той же эпоксидной смоле.

Подготовка, формование и отверждение смолы должны быть проведены за время, не превышающее время ее жизнеспособности.

10.3.1. Добавки, применяемые при формовании изделий из эпоксидных смол

При литье смол большую роль играют наполнители. Они вводятся в литьевую массу в процессе подготовительного производства. Наполнители предназначены для придания необхо-

димых свойств изделию (например, твердости, износостойкости, диэлектрических свойств), удешевления производства, уменьшения усадки изделий. В качестве наполнителей применяются тонкодисперсные и крупнозернистые порошкообразные, а также коротковолокнистые неорганические вещества (кварцевая мука, мел, сланцевая мука, тальк, слюда, графит, металлические порошки, оксиды металлов, короткие стекловолокна и др.). Предварительными поисковыми экспериментами для каждого конкретного случая подбирается наиболее оптимальное количество наполнителя.

Кроме наполнителей применяются и другие добавки. К ним относятся тиксотропные средства (дополнительные компоненты для придания тиксотропных свойств литьевым массам и для предотвращения процесса седиментации частиц дополнительных компонентов); красители; вещества, регулирующие модуль упругости.

При производстве изделий из смол литьевая масса имеет следующий состав: а) смола (при необходимости модифицированная, измельченная); б) отвердитель; в) ускорители процесса отверждения (при необходимости); д) добавки (наполнители, красители и др.). В соответствии с этим и с учетом применяемой системы смолы — отвердители различают модифицированные и немодифицированные, наполненные и ненаполненные литьевые массы холодного или горячего отверждения.

Производство изделий из смол требует подготовительных операций, заключающихся в подготовке формирующих инструментов, литьевых масс. После окончания подготовительных операций осуществляются процессы формования и отверждения, которые включают в себя заливку смолы, собственно отверждение, удаление отформованных изделий и окончательную обработку готовых изделий.

Изделия простых конфигураций, в особенности из холодноотверждающихся литьевых масс, получают без давления, путем так называемого литья без вакуума. Изделия сложной конфигурации (тонкостенные, с углублениями, отбортовками, высокой точности размеров и т. д.), получают литьем под давлением смол, а также способом литья под вакуумом.

10.3.2. Подготовительные операции

Подготовка литьевых форм и исходных компонентов смеси. Подготовка литьевых форм заключается: а) в уходе за формами (удалении после каждого цикла формования остатков смолы и смазки путем протравливания, зачистки, обмывки и т. д.); б) в обработке оформляющих поверхностей формы смазывающим веществом, облегчающим удаление изделий из формы. На оформляющие поверхности формы наносится слой антиадгезионного вещества. В качестве антиадгезионных веществ применяются поливиниловый спирт или поливинилаце-

тат (в случае применения литьевых форм, стойких к воде или растворителям). При этом чистка формы, нанесение антиадгезионного покрытия и сушка производятся перед началом каждого цикла литья смол. Твердые воски в качестве антиадгезионного покрытия (смазки) применяются для любых литьевых форм и при холодном отверждении. Чистка формы и нанесение смазки также необходимы перед началом каждого цикла формования.

Кремнийорганические лаки или масла используются в качестве антиадгезионных покрытий при применении металлических форм и горячего способа отверждения. При этом не требуется частая чистка формы и обновление антиадгезионного покрытия.

Подготовка литьевых масс. При формировании изделий методом литья смол в качестве исходных компонентов используются модифицированные или немодифицированные смолы, отвердители, наполнители, вещества для придания свойств тиксотропии литьевым массам, красители, ускорители реакции отверждения и др. Предполагается при этом правильное хранение всех компонентов (в холодном и сухом месте).

К подготовительным операциям технологического процесса формования изделий из смол относятся предварительная обработка, дозирование и смешение всех компонентов.

Предварительная обработка исходных компонентов смеси. Смола и отвердитель, если они при комнатной температуре имеют высокую вязкость, для улучшения дозирования и обработки предварительно разогреваются до температуры переработки.

Наполнители следует просеивать, сушить (например, под вакуумом в течение 1 ч при 373 К или в потоке горячего воздуха в течение 4—5 ч при 383—423 К) и предварительно подогреть.

Красители необходимо тщательно перетирать в порции смолы до образования цветной маточной пасты.

Дозирование. Количественное соотношение исходных компонентов литьевых масс иногда задается заводом-изготовителем смолы (например, пропорция смола — отвердитель). Заводом-изготовителем также выдаются рекомендации по применению типов ускорителя, разбавителя, красителя и вещества, регулирующего модуль упругости. Тип наполнителя экспериментально подбирается самим потребителем-переработчиком.

При мелкосерийном производстве преимущественно применяется весовое дозирование, а при крупносерийном производстве — объемное. В соответствии с этим применяются дозирующие весы или мерные емкости и дозирующие насосы.

Смешение. Целью смешения является приготовление однородной, свободной от воздушных включений смеси исходных компонентов. Приготовление ненаполненных литьевых масс не представляет сложности. Но при приготовлении наполненных литьевых масс встречаются определенные трудности. Приготов-

ление смеси исходных компонентов рекомендуется проводить в последовательности: а) предварительный подогрев смолы до температуры смешения, добавление в смолу нереакционноспособных добавок, подогрев и введение наполнителя; б) смешение (ручное при небольшом объеме перемешиваемой среды, с перемешивающим устройством при большом объеме смеси); в) дегазация при температуре перемешивания с применением вакуумного отсоса; г) подогрев или охлаждение смеси до температуры переработки и введение отвердителя; д) смешение (вручную или с применением смесителя); е) кратковременная дегазация.

Приготовленную таким образом литьевую массу следует перерабатывать до истечения времени ее жизнеспособности, т. е. за тот промежуток времени, в течение которого вязкость массы достаточно низка, чтобы произвести процесс заливки.

10.3.3. Формование

При литье без вакуумирования литьевая формовочная масса самотеком заливается в оформляющую полость подготовленной формы. Этим способом изготавливаются изделия простой геометрической формы из холодноотверждающих литьевых формовочных масс.

Как при литье без вакуумирования, так и с вакуумированием, должны быть соблюдены следующие условия: а) переработку литьевых формовочных масс следует завершать за время, не превышающее двух третей времени ее жизнеспособности; б) температуру формы необходимо выбирать несколько выше температуры материала и колебания температуры формы должны быть минимальными. В противном случае на внешней поверхности изделий вследствие усадки возникают лунки (рис. 10.5); в) конструкцией литьевой формы, ее температурой и процессом литья следует обеспечить такие условия, чтобы изменение объема смеси, происходящее при переходе в желати-

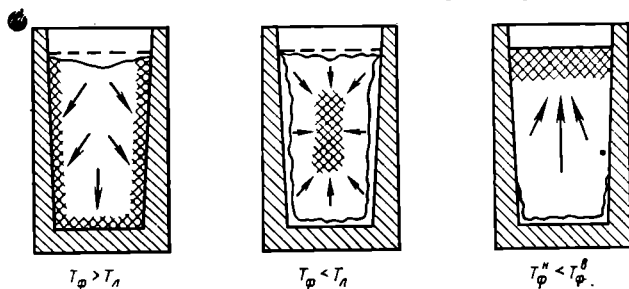


Рис. 10.5. Картина возникновения лунок на внешней поверхности изделия из эпоксидных смол (T_f — температура формы; T_L — температура литьевой массы; T^n — температура в нижней части формы; T^b — температура в верхней части формы). Стрелками показано направление усадки.

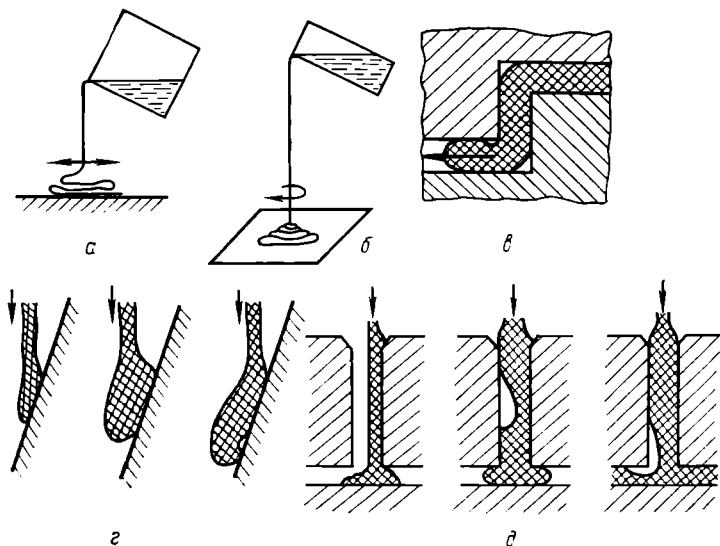


Рис. 10.6. Механизм возникновения воздушных включений в изделиях. Захват воздуха:

а, б — струей литейной массы; в — за счет «мертвых» зон в литейной форме; г — за счет перекачивания литейной массы по стенкам формы; д — за счет колебания струи формовочного материала в заливочной горловине.

нообразное состояние, можно было компенсировать заливкой дополнительной порции литейной массы; г) конструкцией изделия и формы, условием процесса и работой с вакуумированием нужно добиться, чтобы в изделиях не было воздушных включений (рис. 10.6).

Конфигурация изделия, конструкция формующего инструмента и технологические приемы взаимосвязаны друг с другом. При литье без вакуумирования, кроме перечисленных выше особенностей, необходимо учитывать следующие моменты: а) для компенсации усадки в области желатинизации необходимо литниковую систему заполнять до уровня, превышающего уровень формовочной массы в оформляющей полости (см. рис. 10.4); б) посадка всех деталей формы должна быть плотной, чтобы исключить попадание воздуха в оформляющую полость, заполненную литейной массой; в) литейные формы в наивысших точках оформляющей полости должны иметь отверстия для удаления воздуха (см. рис. 10.4); г) при изготовлении изделий сложной конфигурации по возможности необходимо в первую очередь заливать наиболее низко расположенные участки оформляющей полости, чтобы не препятствовать процессу удаления воздуха (см. рис. 10.4); д) литейную форму в процессах заполнения и отверждения необходимо удерживать в строго горизонтальном положении (во время заливки она может быть наклонена, если этим достигаются лучшие условия заполнения оформляющей полости или удаления воздуха);

е) заливку формовочной массы необходимо производить таким образом, чтобы исключить попадание воздуха вместе со струей перерабатываемого материала (см. рис. 10.6); ж) большие изделия (массой > 25 кг) следует изготавливать с особыми предосторожностями, например, поэтапно с промежуточной выдержкой для желатинизации частично залитой массы.

При способе литья «под полувакуумом» литьевая формовочная масса заливается в оформляющую полость формы, находящуюся под вакуумом. При этом литьевая форма, а иногда и отдельные ее части, интенсивно сушатся путем разогрева и отсоса летучих из вакуумируемого литьевого агрегата. Подготовленная формовочная масса заливается в форму, находящуюся под вакуумом, через загрузочную воронку с вентилем, затем литьевой агрегат соединяется с атмосферным воздухом и под действием давления воздуха осуществляется формирование контура изделия без образования пор (см. рис. 10.1).

Этим способом получают изделия сложной конфигурации из формовочных масс горячего отверждения. Необходимо при этом учитывать следующее: а) для уменьшения усадки и удаления воздуха должна быть предусмотрена высокая загрузочная горловина (патрубок); б) в процессе заливки формовочной массы нужно исключить попадание воздуха в оформляющую полость.

При способе литья «при полном вакууме» приготовленная под вакуумом формовочная масса без промежуточной продувки заливается в оформляющую полость формы, находящуюся под вакуумом. Для реализации такой технологии получения изделий из смол существуют специальные агрегаты (см. рис. 10.2 и 10.3), на которых можно изготавливать изделия сложной конфигурации и с арматурой. Глубина вакуума зависит от точки кипения формовочной массы; остаточное давление выбирается в пределах $1,3 \cdot 10^{-2}$ — $1,3 \cdot 10^{-5}$ МПа.

Изделия цилиндрической формы и трубы преимущественно получают во вращающихся вокруг горизонтальной оси центробежных установках, которые выполняют функции формующего инструмента. Под действием центробежных сил формовочная масса равномерно распределяется по внутренней поверхности формующей трубы. Предварительно внутренняя поверхность установки может быть выложена армирующим стекловолоконным материалом.

При небольших скоростях вращения ротора формовочная масса равномерно распределяется по внутренней поверхности оформляющей полости под действием гравитационных сил (ротационное формование), а при больших скоростях вращения ротора действуют центробежные силы, равномерно распределяющие формовочную массу (центробежное формование). Вращение обогреваемого (электрическим способом, горячим воздухом, инфракрасным излучением и т. д.) ротора необходимо осуществлять до полного завершения процесса отверждения. Центробежное формование изделий из смол может применяться так-

же для формирования стеклонаполненных полиэфиров и находит широкое применение при нанесении покрытий на внутренние поверхности труб и сосудов.

При способе литья смол под давлением требуется точная дозировка (в соответствии с размерами изделия) формовочной массы горячего отверждения. Доза формовочной массы заливается в нагретую форму и до окончания процесса желатинизации находится в ней под давлением 0,1—0,5 МПа.

При автоматизированном способе литья смол под давлением (см. рис. 10.2 и 10.3) доза формовочной массы горячего отверждения, необходимая для получения одного изделия, нагнетается в промежуточную емкость, в которой поддерживается определенное давление и которая соединена с помощью трубопровода с подвижной литьевой головкой (соплом). Для заливки литьевая головка подводится к загрузочной воронке закрытой формы, нагретой до температуры переработки. Под действием давления в промежуточной емкости литьевая масса нагнетается в оформляющую полость литьевой формы. При этом способе формирования после окончания процесса желатинизации, протекающего в системе смолы — отвердитель — ускоритель в нагретой форме (до 400—450 К), требуется небольшая выдержка — 8—30 мин (при других способах — 8—10 ч), во время которой осуществляется окончательное формирование и отверждение изделия. Автоматизированным способом можно изготавливать безусадочные изделия больших габаритов с высокой точностью размеров в условиях крупносерийного производства (10—100 тыс. шт. в год) при относительно небольших затратах на оборудование и формы.

10.3.4. Отверждение и извлечение изделий

После формирования в зависимости от типа системы смолы — отвердителя осуществляется процесс холодного или горячего отверждения. В каждом конкретном случае процесс отверждения можно регулировать путем изменения температуры (так как скорость отверждения значительно увеличивается с повышением температуры). При выдержке, превышающей время отверждения массы, ухудшаются свойства изделий, так как в них возникают внутренние напряжения и происходит снижение физико-механических показателей вследствие термического разложения.

Рекомендуются следующие условия отверждения. При холодном отверждении: при комнатной температуре отверждение в течение 12—24 ч, затем термообработка в течение 2—4 ч при 363—373 К. При горячем отверждении: 2—48 ч при 373—473 К.

Компенсация объемной усадки, обусловленной сшиванием макромолекул, обеспечивается подбором правильной конструкции загрузочной горловины, а также проведением процесса

отверждения одновременно по всему объему формовочной массы. Кроме того, для уменьшения объемной усадки в начале процесса устанавливается наименьшая температура и только собственно процесс отверждения, следующий после окончания процесса желатинизации, проводится при повышенной температуре. Собственно процесс отверждения, который включает процессы формования, последующего отверждения и охлаждения, имеет важное значение при формировании свойств готовых изделий.

Для сокращения времени пребывания перерабатываемого материала в формующем инструменте операции отверждения проводят вне литевой формы в термокамерах. Однако при этом необходимо очень осторожно и медленно проводить операцию охлаждения.

Окончательная усадка при учете всех перечисленных выше особенностей процесса формования изделий из смол составляет 0,5—1% (усадка при желатинизации значительно выше).

При изготовлении изделий различной конфигурации из смол требуется незначительная последующая механообработка, а во многих случаях можно ее не применять. При механической обработке удаляются грат, следы загрузочной горловины и вентиляционных каналов, устраняются раковины на внешней поверхности и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов Г. В., Малкин А. Я. Реология полимеров. М., Химия, 1977. 437 с.
2. Мак-Келви Д. М. Переработка полимеров./Пер. с англ. М., Химия, 1965. 442 с.
3. Канавец И. Ф. Определение технологических характеристик термореактивных пластиков. М., ИТЭИ АН СССР, 1956. 87 с.
4. Джув А. Е. — В кн.: Вулканизация эластомеров. Пер. с англ. М., Химия, 1967, с. 37—81.
5. Басов Н. И. и др. — Изв. вузов. Химия и хим. технол., 1969, т. 12, № 11, с. 567—572.
6. Bassow N. I. e. a. — *Plaste u. Kautschuk*, 1974, Bd. 21, N 6, S. 417—420.
7. Бызов Б. В. — ЖРФХО, 1921, т. 53, с. 166—167.
8. Kempermann Th., Clamroth R., Schmittmann H. — *Kautschuk, Gummi, Kunststoffe*, 1969, Bd. 22, N 11, S. 609—612.
9. Басов Н. И., Галле А. Р., Казанков Ю. В. — В кн.: Машины и технология переработки полимеров. Межвуз. сб. науч. тр. Л., ЛТИ, 1970, № 2, с. 58—61.
10. Абрамович Ф. П., Салазкин К. А., Казанков Ю. В. — В кн.: Интенсификация производства формовых РТИ с использованием литевого способа производства. М., ЦНИИТЭнефтехим, 1973, с. 33.
11. Басов Н. И. и др. — Изв. вузов. Химия и хим. технол., 1969, т. 12, № 11, с. 578—582; 1971, т. 14, № 1, с. 126—129.
12. Догадкин Б. А. и др. — *Высокомолекулярное соединение*, 1961, т. 3, с. 497—502.
13. Исследования по физике и химии каучука и резины/Под ред. Е. Ф. Евстратова и Б. А. Догадкина. М. — Л., Госхимиздат, 1950, с. 146.
14. Скачков В. В., Салазкин К. А. — Тр. МИХМ, 1970, вып. 36, с. 142—148.
15. Ахrameев А. Ф., Басов Н. И., Казанков Ю. В. — В кн.: Машины и технология переработки каучуков, полимеров и резиновых смесей. Межвуз. сб. науч. тр. Ярославль, ЯПИ, 1972, с. 37—40.

16. Ахrameев А. Ф., Басов Н. И., Казанков Ю. В. — Каучук и резина, 1973, № 3, с. 18—21.
17. Захарченко Н. В., Толстухина Ф. С., Бартенев Г. М. — Коллоид. ж., 1960, т. 22, № 2, с. 168—170.
18. Mooney M., Black S. A. — J. Coll. Sci., 1952, v. 7, p. 204—208.
19. Павлов В. П., Виноградов Г. В. — Коллоид. ж., 1966, т. 28, № 3, с. 37—42.
20. Канавец И. Ф., Баталова Л. Г. — Пласт. массы, 1964, № 9, с. 50—54.
21. Meyer I. — Plaste u. Kautschuk, 1966, Bd. 13, N 11, S. 660—664.
22. Басов Н. И. и др. — Мех. полимеров, 1971, № 4, с. 619—623; № 5, с. 820—826.
23. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости. Пер. с англ. М., Издательский центр, 1963. 216 с.
24. Фридман М. Л. и др. — В кн.: Реология полимерных и дисперсных систем и реофизика. Материалы VIII Всесоюз. симп. по реологии. Минск, 1975. Ч. 1, с. 189—197.
25. Файтельсон Л. А., Ковтун В. П. — Там же, с. 198—205.
26. Salaskin K. A., Skatschkow V. W., Tschernyck L. S. — Plaste u. Kautschuk, 1976, Bd. 23, N 6, S. 439—443.
27. Chaffey C. E., Brenner H., Mason S. G. — Rheol. Acta, 1965, v. 4, p. 56.
28. Бабкин В. А. — Мех. жидкости и газа, 1975, № 2, с. 80—85.
29. Катышков Ю. В., Скачков В. В., Макаров М. С. — В кн.: Машины и технологии переработки полимеров в изделия. Межвуз. сб. науч. тр. М., МИХМ, 1977, с. 32—37.
30. Modlen G. F. — J. Mater. Sci., 1969, v. 4, p. 283—289.
31. Bird R. B., Armstrong R. G., Hassager O. Dynamics of Polymeric Liquids. V. 1. Fluid Mechanics. N. Y., J. Wiley & Sons, 1977. 320 p.
32. Lenk R. S. Rheologie der Kunststoffe. Munchen, Karl Hanser-Verlag, 1971. 212 S.
33. Winter H. H. — Adv. in Heat Transfer, 1977, v. 13, p. 205—267.
34. Langer G. — Rheol. Acta, 1978, v. 17, p. 77—97.
35. Gabili N. E. A. — Rheol. Acta, 1975, v. 14, p. 550—567.
36. Gabili N. E. A. — Ibid., p. 816—831.
37. Brinkman H. C. — Appl. Sci. Res., 1951, v. 2, p. 120.
38. Schuler H. Dis. Berlin, Technische Universität, 1969.
39. Cox H., Macosko C. — Amer. Ind. Chem. Eng. J., 1974, v. 20, p. 785—795.
40. Daryanani R. e. a. — Rheol. Acta, 1973, v. 12, p. 19—24.
41. Stephan K. — Chem. Ing.-Techn., 1967, Bd. 39, S. 243—250.
42. Bird R. B. — SPE Journal, 1955, v. 11, p. 35.
43. Mennig G. — Plastics a. Polymers, 1972, v. 40, p. 330.
44. Mennig G. — Kunststoffe, 1975, Bd. 65, N 10, S. 693—695.
45. Albring W. Angewandte Stromungslehre. Dresden, 1970, 223 S.
46. Jekimow A. U. — Plaste u. Kautschuk, 1974, Bd. 21, S. 925—929.
47. Noll W. — Arch. Rat. Mech. Anal., 1958, v. 2, p. 197.
48. Colemann B. D., Noll W. — Arch. Rat. Mech. Anal., 1959, v. 3, p. 289.
49. White I. L. — J. Appl. Polymer Sci., 1964, v. 8, p. 3.
50. White I. L. — J. Appl. Polymer Sci., 1964, v. 8, p. 1129.
51. Han C. D. e. a. Rheol. Acta, 1975, v. 14, p. 533—549.
52. Lodge A. S. — Rheol. Acta, 1968, v. 7, p. 379—392.
53. Halasci L., Moudvi I. — Plaste u. Kautschuk, 1976, Bd. 23, S. 589—593.
54. Чанг Дей Хан. Реология в процессах переработки полимеров. Пер. с англ./Под ред. Г. В. Виноградова, М. Л. Фридмана. М., Химия, 1979. 368 с.
55. Mendelson R. A. — J. Polymer Sci., 1970, pt A-2, v. 8, p. 105—126.
56. Mendelson R. A., Bowles W. A. — Ibid., p. 127—141.
57. Comss R. L., Slonaker D. F. e. a. — J. Appl. Polymer Sci., 1969, v. 13, p. 519—534.
58. Takerman-Krozer R. — Rheol. Acta, 1971, v. 10, p. 243—249.
59. Muller F. H. — Koll. Ztschr., 1953, Bd. 134, N 2/3, S. 215.
60. Ehrmann G. — Rheol. Acta, 1976, v. 15, p. 8—14.
61. Meifner I. — Coll. a. Polymer Sci., 1974, v. 252, p. 760—765.
62. Meifner I. — Rheol. Acta, 1971, v. 10, p. 230.

63. *Holzmüller W., Weiss Z.* Karl-Marx-Univ., Leipzig Math. — Naturwiss., 1971, N 4/5, S. 591—599.
64. *Timm H.* — Kautschuk u. Gummi, 1971, Bd. 24, S. 391—398.
65. *Geisler H., Muller H. G.* — Rheol. Acta, 1979, v. 18, p. 96—103.
66. *Goldblatt P. H.* — J. Appl. Polymer Sci., 1976, v. 20, p. 1199—1208.
67. *Semjonow V.* — Rheol. Acta, 1965, v. 4, p. 133—137.
68. *Menges G., Geisbusch P., Ziugel U.* — Kautschuk u. Gummi, Kunststoffe, 1979, Bd. 32, N 7, S. 485—492.
69. *Mickaelli W.* Ekstrusionswerkzeuge für Kunststoffe. München — Wien, Karl Hanser Verlag, 1979. 172 S.
70. *Tadmor Z., Duwdevani I. J., Klein I.* — Polymer Eng. a. Sci., 1957, v. 7, p. 198.
71. *Lohr D.* — Kunststoffe, 1973, Bd. 63, N 10, S. 738—741.
72. *Lohr D.* — Chemische Techn., 1975, Bd. 4, N 4, S. 240.
73. Lehrbuch der Chemischen Verfahrenstechnik. Leipzig, Veb Deutscher Verlag Grundstoffindustrie, 1973. 287 S.
74. *Kassatkin A. G.* Chemische Verfahrenstechnik. Leipzig, Veb Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1961, Bd. 2. 572 S.
75. *Kaiser R.* — Kunststoffe, 1976, Bd. 66, N 12, S. 32.
76. *Mathews A.* — Kunststoffe, 1973, Bd. 63, N 12, S. 35—38.
77. *Mathews A.* — Kunststoffe, 1977, Bd. 67, N 5, S. 248—265.
78. *Dobozky Z.* — Plastverarbeiter, 1977, Bd. 28, N 10, S. 536—538.
79. *Senet D. O.* — Chemie-Anl. u. Verf., 1975, N 3, S. 45—47.
80. *Johannaber F.* — Kunststoff-Berater, 1974, Bd. 19, N 3, S. 115—117.
81. *Kim W. S. u. a.* — Plaste u. Kautschuk, 1978, Bd. 25, N 3, S. 292—293.
82. *Weressowa G. N. u. a.* — Plaste u. Kautschuk, 1975, Bd. 22, N 3, S. 261—264.
83. *Kim W. S. u. a.* — Plaste u. Kautschuk, 1976, Bd. 23, N 2, S. 906—908.
84. *Макаров Ю. И.* Аппараты для смешения сыпучих материалов. М., Машиностроение, 1973. 215 с.
85. *Mohr W. D. e. a.* — Ind. Eng. Chem., 1957, v. 49, N 11, p. 1855—1856.
86. Переработка термопластичных материалов/ Сост. Э. Бернхардт. М., Госхимиздат, 1962. 746 с.
87. *Катышков Ю. В., Скачков В. В., Макаров М. С.* — В кн.: Машины и технология переработки полимеров в изделия. Межвуз. сб. науч. тр. М., МИХМ, 1977, с. 29—37.
88. *Боровикова С. М., Лурье Е. В., Скачков В. В.* — Пласт. массы, 1977, № 11, с. 22—24.
89. *Петров Б. А., Скачков В. В.* — В кн.: Процессы и аппараты производства полимеров, методы и оборудование для переработки их в изделия. Межвуз. сб. науч. тр. М., МИХМ, с. 57—59.
90. *Скачков В. В., Салазкин К. А.* — В кн.: Производство и переработка пластмасс и синтетических смол. Техн. и эконом. информ. М., НИИТЭХИМ, 1971, вып. 2, с. 33—41.
91. *Ким В. С., Скачков В. В.* Оборудование подготовительного производства заводов пластмасс. М., Машиностроение, 1977. 183 с.
92. *Kasir L., Tadmor Z.* — Polymer Eng. a. Sci., 1972, v. 12, N 5, p. 387—395.
93. *Broeyer E., Tadmor Z.* — Ibid., a N 1, p. 12—24.
94. *Торнер Р. В.* Теоретические основы переработки полимеров. М., Химия, 1974. 462 с.
95. *Tadmor Z.* — Polymer Eng. a. Sci., 1966, v. 6, N 3, p. 185—190; 1967, v. 7, N 3, p. 198—206.
96. *Kim W. S. u. a.* — Plaste u. Kautschuk, 1978, Bd. 25, N 6, S. 348—351.
97. *Балашов М. М., Левин А. Н.* — Хим. машиностр., 1961, № 6, с. 29—34.
98. *Бастанджиян С. А., Столин А. И.* — Изв. АН СССР. Мех. жидкости и газа, 1965, № 4, с. 350—354.
99. *Chong R. R.* — J. Appl. Polymer Sci., 1968, v. 12, N 1, p. 115—127.
100. *Евменов С. Д., Ким В. С., Скачков В. В.* — Тр. МИХМ, 1974, вып. 54, с. 63—71.
101. *Kim W. S. u. a.* — Plaste u. Kautschuk, 1976, Bd. 23, N 9, S. 665—669.

102. Шенкель Г. Шнековые прессы для пластмасс. Л., Госхимиздат, 1962. 467 с.
103. Рябинин Д. Д., Лукач Ю. Е. Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей. М., Машиностроение, 1965. 362 с.
104. Балашов М. М., Ахременков В. И. — В кн.: Машины и технология переработки полимеров в изделия. Межвуз. сб. науч. тр. М., МИХМ, 1977, с. 127—136.
105. Schneider K. — Kunststoffe, 1969, Bd. 59, N 11, S. 757—762.
106. Силин В. А. Динамика переработки пластмасс и червячных машин. М., Машиностроение, 1972. 150 с.
107. Ким В. С., Скачков В. В., Кошелев Г. Г. — Тр. МИХМ, 1974, вып. 54, с. 58—63.
108. Schenkel G. — Kunststoffe, 1970, Bd. 60, N 1, S. 52—60; N 2, S. 129—135, 196—200.
109. Mohr W. D., Saxton R. L., Jepson C. H. — Ind. Eng. Chem., 1957, v. 49, N 11, p. 1857—1862.
110. Burger F. — Plastverarbeiter, 1976, Bd. 27, N 6, S. 324—325.
111. Torner R. V. Grundprozesse der Polymerverarbeitung. Leipzig, Verlag für Grundstoffindustrie, 1975. 366 S.
112. Dalhoff W. Systematische Extruderkonstruktion. Mainz, Krausskopf — Verlag GmbH, 1974. 218 S.
113. Dominghaus H. Fortschrittliche Extrudertechnik. Dusseldorf, VDI — Verlag, 1970. 158 S.
114. Fischer P. — Kunststofftechnik, 1971, Bd. 10, N 10, S. 345—351.
115. Эндлер Ф. Канд. дис. Л., ЛТИ им. Ленсовета, 1972.
116. Trepte H. u. a. — Plastwerkzeuge. Berlin, Verlag Technik, 1981. 412 S.
117. Scheider K. — VT-Verfahrenstechnik, 1978, Bd. 12, N 8, S. 477—485.
118. Michaeli W. Extrusionswerkzeuge für Kunststoffe. München, Karl Hanser-Verlag, 1979. 252 S.
119. Фридман М. Л. Технология переработки кристаллических полиолефинов. М., Химия, 1977. 397 с.
120. Kress G. u. a. Extrudieren von Schlauchfolien. Dusseldorf, VDI-Verlag GmbH, 1973. 186 S.
121. Fischer E. G. Extrusion of Plastics. London, 1958. 196 p.
122. Wyman C. E. — Polymer Eng. a. Sci., 1975, v. 15, N 8, p. 606—611.
123. Dobozy Z. — Plastverarbeiter, 1965, Bd. 16, N 7, S. 118—128.
124. Jewmenow S. D., Kim W. S. — Plaste u. Kautschuk, 1973, Bd. 20, N 5, S. 356—360.
125. Kim W. S., Scatschow W. W. — Plaste u. Kautschuk, 1973, Bd. 20, N 9, S. 696—702.
126. Kim W. S., Skatschkow W. W., Jewmenow S. D. — Plaste u. Kautschuk, 1975, Bd. 22, N 9, S. 730—734.
127. Машины и технология переработки каучуков, полимеров и резиновых смесей. Межвуз. сб. науч. тр. Ярославль, ЯПИ, 1978, вып. 1, с. 110—121.
128. Машины и технология переработки каучуков, полимеров и резиновых смесей. Межвуз. сб. науч. тр. Ярославль, ЯПИ, 1980, вып. 3, с. 101—114.
129. Лукомская А. И., Баденков П. Ф., Кеperша Л. М. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий. М., Химия, 1972. 359 с.
130. Малкина Х. Э., Пухов А. П. — Тр. НИИШП, 1966, вып. 6, с. 36—40.
131. Калинин Э. Л., Левин А. Н. — Хим. машиностр., 1963, № 2, с. 8—11.
132. Кругликов Р. М., Ноткин В. М. Прогрессивное оборудование для переработки реактопластов в изделия. Л., ЛДНТП, 1972. 32 с.
133. Hauenstein K. — Kunststoffe-Plastics, 1972, Bd. 19, N 7, S. 18—24.
134. Шварц А. И., Конгаров Г. С. Литьевое формование резиновых технических изделий. М., Химия, 1975. 167 с.
135. Загородный В. К., Калинин Э. Л., Марам Е. И. Литьевые машины для переработки термопластов и реактопластов. М., Машиностроение, 1968. 376 с.
136. Павлов В. Б. Современное литьевое оборудование для производства формовых РТИ. М., ЦНИИТЭнефтехим, 1976. 85 с.

137. *Городничев Ю. Н., Басов Н. И., Казанков Ю. В.* — Производство шин, РТИ и АТИ, 1974, № 7, с. 15—18.
138. *Fvaser D. F., Hendrik J. V.* — *Rubb. Age*, 1944, v. 56, p. 277—282.
139. *Gummi, Asbest, Kunststoffe*, 1976, Bd. 29, N 11, S. 799—803.
140. *Musseli W.* — *Europ. Rubb. J.*, 1976, v. 158, N 8, p. 16—19.
141. *Sproo B. H.* — *J. Elast. a. Plast.*, 1977, v. 9, N 7, p. 313—318.
142. *Михайлов С. З., Казанков Ю. В., Салазкин К. А.* — *Тр. МИХМ*, 1974, вып. 54, с. 22—30.
143. *Лапшин В. В.* Основы переработки термопластов литьем под давлением. М., Химия, 1974. 271 с.
144. *Абрамович Ф. П., Казанков Ю. В.* — Производство шин, РТИ и АТИ, 1974, № 5, с. 22—24.
145. *Басов Н. И., Казанков Ю. В., Межуев В. В.* — *Тр. ВНИИРТмаш*, 1972, вып. 6, с. 17—26.
146. *Bassow N. I. e. a.* — *Plaste u. Kautschuk*, 1976, Bd. 23, N 11, S. 823—827.
147. *Леонов А. И., Басов Н. И., Казанков Ю. В.* Основы переработки реактопластов и резин методом литья под давлением. М., Химия, 1977. 216 с.
148. *Weressova G. N., Kazankov Ju. W. Kim W. S., Bassov N. I.* — *Plaste u. Kautschuk*, 1977, Bd. 24, N 3, S. 199—203.
149. *Ахrameев А. Ф., Басов Н. И., Казанков Ю. В.* — *Каучук и резина*, 1973, № 3, с. 26—30.
150. *Казанков Ю. В.* — *Пласт. массы*, 1979, № 7, с. 21—24.
151. *Калинчев Э. Л., Жаров А. И.* — В кн.: Производство и переработка пластмасс и синтетических смол. М., НИИПМ, 1974, № 9, с. 21—26.
152. *Енш И., Михаель Х., Лиер Э.* — В кн.: Машины и технология переработки полимеров в изделия. Межвуз. сб. науч. тр. М., МИХМ, 1977, с. 48—51.
153. *Dawis M.* — *Plast. Eng.*, 1977, v. 33, N 4, p. 26—30.
154. *Kohler R.* — *Plastverarbeiter*, 1974, Bd. 25, N 4, S. 193—200.
155. *Казанков Ю. В.* — *Пласт. массы*, 1979, № 9, с. 15—19.
156. *Ясонов В. Н., Басов Н. И., Казанков Ю. В.* — В кн.: Качество изделий полимерного машиностроения. Тамбов, ВНИИРТмаш, 1976, с. 109—113.
157. *Bassow N. I., Leonov A. I., Kazankov Ju. W. e. a.* — *Kunststoffe*, 1975, Bd. 65, N 1, S. 31—38.
158. *Казанков Ю. В., Городничев Ю. Н., Галле А. Р.* — В кн.: Машины и технология переработки полимеров в изделия. М., МИХМ, 1977, с. 68—72.
159. *Ясонов В. Н., Басов Н. И., Казанков Ю. В.* — Там же, с. 60—63.
160. *Pohigo F. G., Flodman R. E.* — *SPE Journal*, 1962, v. 18, p. 518.
161. *Benjamin G., Carr D.* — *Brit. Plast.*, 1963, v. 36, N 4, p. 178.
162. *Басов Н. И., Казанков Ю. В.* — *Пласт. массы*, 1969, № 4, с. 38—39.
163. *Басов Н. И., Фелипчук И. И.* — *ИФЖ*, 1971, т. 20, № 4, с. 96—102.
164. *Басов Н. И., Леонов А. И., Любартович В. А. и др.* — *Мех. полимеров*, 1974, № 6, с. 1127.
165. *Басов Н. И., Фелипчук И. И.* — *Пласт. массы*, 1974, № 6, с. 25.
166. *Bassov N. I., Leonov A. I., Liubartovitsch S. A., Pheliptschuk I. I.* — *Plaste u. Kautschuk*, 1975, Bd. 22, N 12, S. 970.
167. *Pheliptschuk I. I., Bassov N. I., Leonov A. I., Liubartovitsch S. A.* — *Plaste u. Kautschuk*, 1976, Bd. 23, N 10, S. 752.
168. *Ищенко В. Г., Попов А. В., Майзель М. М.* — Производство шин, РТИ и АТИ, 1970, № 8, с. 7—8.
169. *Ищенко В. Г., Попов А. В., Майзель М. М.* — Производство шин, РТИ и АТИ, 1970, № 2, с. 6—7.
170. *Любартович С. А., Фелипчук И. И.* — *Тр. ВНИИРТмаш*, 1974, вып. 7, с. 196.
171. *Woebcken W. Jens E.* — *Kunststoffe*, 1967, Bd. 57, N 8, S. 637—644.
172. *Bassov N. I., Leonov A. I., Liubartovitsch S. A., Pheliptschuk I. I.* — *Plaste u. Kautschuk*, 1977, Bd. 67, N 7, S. 487—491.
173. *Басов Н. И., Ким В. С., Скуратов В. К.* Оборудование для производства объемных изделий из термопластов. М., Машиностроение, 1972. 217 с.
174. *Басов Н. И., Фелипчук И. И.* — *ИФЖ*, 1971, т. 20, № 4, с. 710—714.
175. *Басов Н. И. и др.* — *ТОХТ*, 1973, т. 7, № 1, с. 80—88.

176. Басов Н. И. и др. — ТОХТ, 1975, т. 9, № 5, с. 37—42.
177. Соколов А. Д., Швеиц М. М. Литые реактопласты. М., Химия, 1975. 158 с.
178. Седов Л. И. Методы подобия и размерностей в механике. 7-е изд. М., Наука, 1972. 440 с.
179. Калинин Э. Л., Марам Е. И. — Пласт. массы, 1967, № 10. 328 с.
180. Ballman R. L., Toor H. L. — Mod. Plast., 1959, v. 37, N 1, p. 105.
181. Оборои В. Н., Шанин Н. П. — Уч. зап. ЯТИ, 1968, т. 23, с. 18—26.
182. Самойлова В. А., Фелипчук И. И. — Тр. ВНИИРТмаш, 1976, с. 167—174.
183. Арутюнов Б. А., Басов Н. И. — В кн.: Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф., М., МИХМ, 1970, с. 101—102.
184. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика. Справочное пособие. М., Машиностроение, 1971. 670 с.
185. Кольман-Иванов Э. Э., Салазкин К. А. Таблеточные машины. М., Машиностроение, 1966. 228 с.
186. Езжев А. С., Осипов Н. В. — Тр. ВНИИРТмаш, 1976, с. 164—166.
187. Завгородний В. К. Механизация и автоматизация переработки пластических масс. М., Машиностроение, 1970. 595 с.
188. Кошкин Л. Н. Комплексная автоматизация производства на базе роторных линий. М., Машиностроение, 1972. 351 с.
189. TGL 160—251/01—05, Dezember, 1972. [Госты ГДР].
190. Standardverzeichnis des VEB Kombinat Plast- und Elastverarbeitung Berlin und des VEB Reifenkombinat Furstenwalde, Ausgabe August, 1980.
191. Stoeckert K. Kunststofflexikon. Munchen, Karl Hanser-Verlag, 1961, 276 S.
192. TGL 17448/10, Dezember, 1975.
193. Bauer W. — Kunststoffe, 1962, Bd. 52, N 1, S. 252.
194. Schonthalter W. Verarbeiten Hartbarer Kunststoffe. Dusseldorf, VDI-Verlag GmbH, 1973. 296 S.
195. Meyenburg C. M. — Kunststoffe, 1957, Bd. 47, N 1, S. 14—17.
196. Schaaf W., Hahnemann A. Verarbeitung von Plasten. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1968. 412 S.
197. Bauer W., Woebeck W. Verarbeitung Duroplastischer Formunassen. Munchen, Karl Hanser-Verlag, 1973. 376 S.
198. Воскресенский А. М., Нейман Я. С., Никитин Ю. В. — Пласт. массы, 1975, № 2, с. 27—28.
199. Воскресенский А. М., Нейман Я. С., Никитин Ю. В. — В кн.: Машины и технология переработки полимеров. Л., ЛТИ им. Ленсовета, 1974, с. 105—111.
200. Вульф М. А., Московский С. Л., Никитин Ю. В., Бухгалтер В. И. — Пласт. массы, 1976, № 5, с. 34—36.
201. Красовский В. И., Воскресенский А. М. — В кн.: Сборник примеров и задач по технологии переработки полимеров. Минск, Высшая школа, 1975. 320 с.
202. Реутов С. В. Автореф. канд. дис. М., МИЭИ им. С. Орджоникидзе, 1977.
203. Салазкин К. А., Реутов С. В. — В кн.: Машины для переработки полимерных материалов. М., Машиностроение, 1964, с. 158—167.
204. Салазкин К. А., Шерышев М. А. Машины для формования изделий из листовых термопластов. М., Машиностроение, 1977. 158 с.
205. Шерышев М. А., Сазонов А. В., Шленский О. Ф. — В кн.: Тез. докл. XXX науч.-техн. конф. МИХМА. М., МИХМ, 1970. Т. 2, вып. 1, с. 133—197.
206. Шерышев М. А., Салазкин К. А. — Хим. и нефт. машиностр., 1971, № 12, с. 21—22.
207. Шерышев М. А., Салазкин К. А. — Пласт. массы, 1970, № 10, с. 26—28.
208. Rohv H., Heidenreich K. — Kunststoffe, 1970, Bd. 60, N 11, S. 822.
209. Scheryschew M. A., Salaskin K. A. — Plaste u. Kautschuk, 1975, Bd. 22, N 1, S. 40.
210. Solomovici E., Mandeal R. Vacuumarea Foliiilor din Materiale Termoplastice, Bucuresti. Centrul de Documentare si Publicatii Tehnike, Ministerul Industrii US ARE, 1970. 320 p.
211. Тальвик Р. Я., Левин А. Н. — Пласт. массы, 1966, № 4, с. 51—56.

212. Чистов В. И. и др. — В кн.: Машины и технология переработки полимеров. Межвуз. сб. науч. тр. Л., ЛТИ, 1976, № 1, с. 32—37.
213. Практикум по технологии переработки пластических масс/Под ред. В. М. Виноградова, Г. С. Головкина. М., Химия, 1980. 240 с.
214. Тендлер В. М. Новые методы изготовления судовых деталей из стеклопластика. Л., Судостроение, 1969. 80 с.
215. Обручников А. С. и др. — В кн.: Машины и технология переработки полимеров. Межвуз. сб. науч. тр. М., МИХМ, 1977, с. 98—102.
216. Макаров М. С., Казанков Ю. В. Производство изделий из стеклопластиков. Л., Химия, 1973. 77 с.
217. Оборудование для переработки пластмасс. Справочное пособие/Под ред. В. К. Завгороднего. М., Машиностроение, 1976. 416 с.
218. Салазкин К. А., Макаров М. С., Вишнеvский В. А. — В кн.: Процессы и аппараты производства полимеров, методы и оборудование для переработки их в изделия. М., МИХМ, 1977, с. 136, 137.
219. Обручников А. М., Макаров М. С., Чистов В. И. — В кн.: Процессы и аппараты производства полимеров, методы и оборудование для переработки их в изделия. М., МИХМ, 1977, вып. 1, с. 139.
220. Макаров М. С., Обручников А. С., Чистов В. И. — В кн.: Машины и технология переработки полимеров в изделия. Межвуз. сб. науч. тр. М., МИХМ, 1977, с. 102—106.
221. Haberstolz P. — Kunststoff-Berater, 1977, Bd. 28, N 6, S. 325—333; Bd. 28, N 7/8, S. 374—381; Bd. 28, N 9, S. 434—445; Bd. 28, N 10, S. 522—529; Bd. 28, N 11, S. 591—601; Bd. 28, N 12, S. 678—681; 1978, Bd. 28, N 1, S. 28—35; Bd. 28, N 2, S. 78—86; Bd. 28, N 3, S. 138—145; Bd. 28, N 4, S. 206—213.
222. Auffenberg D. Dis. Aachen, RWTH, 1975.
223. Hengesbach H. A. Kolloquium des IKV, Aachen, 1976, S. 37—42.
224. Schneider H. Dämpfungseinrichtungen in Kniehebelschließeinheiten von Schpritzgießmaschinen, DDR-WP 136722.
225. Engel G., Richtev G. — Plaste u. Kautschuk, 1980, Bd. 27, N 10, S. 565—569.
226. Menges G., Elbe W. — Plastverarbeiter, 1973, Bd. 24, N 3, S. 137—138.
227. Johannaber F. — Kunststoffe, 1973, Bd. 63, N 8, S. 480—496; 1975, Bd. 65, N 10, S. 38—64.

АБС-пластик 81, 200, 205, 351, 431
 Актомодельная переменная 345, 346
 Агрегатирование 383
 Агрегаты 14
 валковые 479
 для гранулирования 200
 для желатинизации 466
 для каширования 479
 копировальные 479
 для литья смол 500
 для нанесения покрытий 208, 209, 466
 смесительные 97
 сушильные 466
 для упаковки 416
 экструзионно-раздувные 215
 экструзионные 202, 203, 207
 Аккумуляторы 374, 376
 Алмansi мера 23
 Аминопласты 269, 351, 394, 395
 Аномально-вязкие жидкости 26, 136, 141
 Аррениуса уравнение 32, 49, 50
 Асбестовое волокно 406, 409

Барабаны 436, 478, 479
 Бартенева уравнение 32
 Бингамовская жидкость 26, 44, 46, 48
 Больцмана закон 30, 31
 Бомбировка валков 474
 Бункеры 152, 153

Вакуум-формование 10, 16, 211, 416, 422, 429, 434
 Валки
 бомбировка 474
 гибочные 421
 гладкие 463
 каландров 473
 отжимные 491
 прикатывающие 488
 промазочные 463, 464
 расширительные 467
 рифленные 463
 тисильные 478, 480
 Вальцы 11, 93, 99, 471
 двухвалковые 15
 подогревательные 248
 Виброформование 293, 304, 309
 Вильямса — Ферри уравнение 36, 37
 Вискозиметры 40, 41, 56, 57
 Влажность 352
 «Внутренний срыв» 58
 Волокна 403, 406
 Волокнит 62, 63, 115, 118, 124
 Впрыск 246, 286

Вращение червяков
 встречное 177, 183, 184 сл.
 однонаправленное 175, 177, 178, 183, 184 сл.

Время
 вращения червяка 257
 выдержки 349, 389
 «жизнеспособности» 245, 351, 487
 заполнения формы 326
 отверждения 392, 394, 510
 охлаждения 216, 448
 пластикации 277, 282
 подвулканизации 49, 245, 246
 пребывания в зоне дозирования 144
 пропитки 495, 497
 релаксации 30, 295, 297
 скоринга 49, 245
 смешения 82
 цикла 267, 427, 431, 432, 450, 499

Вспенивание 80, 268, 286
 Вулканизация 49, 54, 250, 252, 254, 257, 258, 268, 271
 Выдержка под давлением 231 сл., 340 сл., 246, 254
 Вынужденный поток 135, 136, 140
 Высечка 16
 Высокоэластическое состояние 10, 106, 111, 415, 418, 419
 Выталкиватели 413 сл.
 Вытяжка 418
 биаксиальная 424, 427
 предварительная 424, 425
 продольная 478

Вязкие жидкости 27 сл.
 Вязкопластичная среда 26, 245
 Вязкость 11, 287, 499
 при бесконечно большом сдвиге 27, 28
 зависимость от давления 35 сл.
 кажущаяся 27, 38, 357
 модельной жидкости 171
 наполненных композиций 54
 ньютоновская 26
 при нулевом сдвиге 28, 41
 ньютоновская 29, 32
 полимерных смесей 32 сл., 48
 расплава 193, 214
 при растяжении 41, 42
 при сдвиге 42
 суспензий 54, 55
 температурная зависимость 31, 35 сл.
 ударная 210, 307, 392, 393
 эффективная 34, 72, 176

Вязкоупругие жидкости 27
Вязкотекучее состояние 10, 245

Газопроницаемость 210

Гели 454

Генки мера 23

Геодезические линии 492

Герца контактная задача 111

Гибка 420 сл.

Гидродинамика потоков 133 сл., 168

Гильза калибрующая 203

Гидромоторы 358, 359

Гидроформование 434

Головка 163

с боковым питанием 199

с вертикальной выдачей 206

с горизонтальной выдачей 206

двухручьевая 225

с копильником 225

литевая 510

многоручьевая 224

ножевая 99

оффсетная 200, 204

плоскощелевая 16, 205, 206, 225

прямоточная 195, 200, 213, 220

со скошенным конусом 222

смесительная 460, 461

трубная 195, 220

угловая 196, 200, 204, 213, 221

с упругой дроссельной планкой 205

червячного пластилятора 260

экструзионная 195 сл., 220, 225

Гранулят 12, 250, 452

Гранулирование 10, 12, 80, 200—202

Грануляторы 99, 200

Грат 262, 402, 406

Грина мера 23

Гука закон 443

Давление

впрыска 394, 395

в головке 159, 170

по длине червяка 162

дожатия 254, 336, 349

в зоне загрузки 127

— — плавления 142

изотропное 294

в канале 75, 76, 77, 79, 135, 223

литья 287, 292, 321, 351

пластикаши 268, 277, 283

подпитки 254

подпора 357, 364

прессования 378, 380, 389, 402

прижима 450, 451

в форме 254, 326, 327, 335, 346, 364

формования 314, 315, 427, 434, 488

в формующем инструменте 140, 154, 185, 304

Давление

штамповки 432

при экструзии 115

Дегазация 80, 148, 456, 458

Деформация 21

высокоэластическая 41

осесимметричная 70

пластическая 365

растяжения по Генки 42

сдвиговая 23, 89, 90, 146, 147

течения 42

упругая 211

хрупкая 365

Дилатантная жидкость 26, 27

Диспергирование 11, 80, 83, 99 сл., 106 сл., 109 сл., 114 сл., 148 470

Диссольверы 455, 456

Дозирование 101, 105, 264, 265, 284, 386, 456, 463, 506

Дорн 195, 196, 198, 203, 204, 208, 213, 223, 226

Дорнодержатель 195, 196, 220

Дробилки 100, 112

Желатинизация 84, 452, 453, 465 сл., 510

Жизнеспособность 245, 351, 487

Загрузка 142, 386, 401, 406

Загрузочные устройства 119, 120, 124, 152

Закон

Больцмана 30, 31

Гука 443

Ньютона 25

распределения случайных величин 86

степенной 44, 72, 271, 288, 294

Фика 84

Зазоры

боковые 183, 184, 187

зацепления червяков 176, 182, 193

межвалковые 186

формующие 223

«Замораживание» напряжений 292

Заполнение формы 13, 249, 287 сл., 317 сл.

Застойные пространства 94, 226

Затвердевание 231 сл.

Затвор байонетный 157, 200

Зацепление червяков 176, 182

Зона

вакуумирования 193

входная 197

выдавливания 120, 154, 166, 167, 176

дегазации 120, 121, 148, 150

диспергирования 120, 148

дозирования 120, 121, 133 сл.,

Зона

143, 150, 154, 156, 164, 167, 176
загрузки 115, 120, 122 сл., 154, 159, 176
интенсивного сдвига 156
«мертвая» 226
переходная 163, 198
питания 120, 122 сл.
плавления 115, 117, 120, 128 сл., 143, 154, 155
пластики 115, 117, 120, 128 сл., 154, 155, 162, 163
прокатки 177
сжатия 117
смещения 120, 156
транспортирования 154
формирующая 198

Игла дутьевая 213, 214

Измельчение 80, 99 сл., 106 сл.

Инtruзия 255 сл.

Кабели 160, 197, 208

Каландрование 10, 15, 452 сл., 468 сл., 473 сл., 477

Калибровка 203, 206, 227

Калибрующие устройства 195

Каналы 225, 279

вентиляционные 229, 230, 352
винтовые 121, 190
глубина 122
кольцевые 72, 73, 76
конические 72, 73, 76
литниковые 318, 407, 408
плоскошелевые 73, 74
призматические 73, 78
произвольной формы 72, 73, 75
прямоугольные 309, 311, 312
формирующие 14
цилиндрические 72, 73, 76
червяка 120, 198, 268 сл.

Карманы зажимные 227, 228

Карусельные машины 436, 437

Квазиоднородная жидкость 61

«КО-кнеттеры» 93, 97, 99

Коленчато-рычажный узел 354

Кольца 369, 371, 373

Константинова уравнение 185

Константы

Вильямса — Ферри 37
реологические 28, 44, 68, 72, 129
сыпучей среды 84

Контактная задача Герца 111

Копильник расплава 299

Коши мера 23

Коши тензор 30

Коэффициенты

анизотропии 308
вариации 88
вязкости 25, 26, 227, 291

Коэффициенты

геометрической формы 72, 74, 75, 76, 77, 78, 79

давления 37, 38

диффузии 84, 151

жесткости при сдвиге 26

заполнения 406

использования формы 216, 217

неоднородности 88, 108, 143, 148

плотности зацепления 185

полезного действия 358, 360, 450

поперечного сжатия 33

проницаемости 485, 486

Пуассона 33, 62, 147, 443, 450

разбухания 239

раздувания 241

расходные 266

сопротивления 198

температуропроводности 67, 287, 340

теплопроводности 66, 127, 129, 131

термического расширения 211

трения 123, 127, 128, 159, 374, 492

трутоновской вязкости 25

утяжки 438

Фикентчера 457

формования 430, 434

формы 230

Краскотерки 100

Кремнийорганические смолы 16, 487, 488, 489, 502

Критерий

оценки смешения 87, 88, 89, 147

Пекле 149

Пирсона 87

Фурье 151

«Хи-квадрат» 87

Куна — Марка — Хувинка уравнение 33

Лапласа уравнение 442

Ленточные машины 436

Линии 14

«замерзания» 208

заполнения 337

каландровые 473, 477

для нанесения покрытий 208

для производства листов 205

— — плоских пленок 205, 206

— — рукавных пленок 207

— — труб 202 сл.

роторные 15, 381 сл., 385 сл.

спая 221, 225

экструзионные 200 сл.

Лисерсия 240

Листы 205 сл., 220, 468, 473, 497

Литье

под давлением 10, 13, 211, 243 сл., 251 сл., 396, 417

Литы
 изделий из смол 499 сл.
 «при полном вакууме» 509
 «под полувакуумом» 509
 Литьевоe формование 15, 251, 258 сл.
 Литьевые машины 248, 249
 Лоджу уравнение 30
 Лошмидта число 35

 Максвелловская жидкость 29
 Манжеты 372, 373
 Манипуляторы 19
 Мера
 Алманси 23
 Генки 23
 Грина 23
 Коши 23
 Свейнгера 23
 «Мертвые» зоны 94
 Мельницы 100, 112
 Метод
 вибропоршневой 309
 вырубки 420
 заливки 10
 кипячения 393
 конечных разностей 181
 контактного формования 17
 контризгиба 474
 литевой 212
 литья под давлением 10, 13, 243
 литья смол 498
 механической обработки 18
 «накатанных сеток» 443
 намотки 17, 18
 напыления 17
 определения прочности 242
 перекаса осей валков 474
 переработки полимеров 10 сл.,
 13 сл., 418 сл.
 подготовки сырья 10 сл.
 полива 10
 прессования 10, 15, 17, 258,
 365 сл.
 пропитки 18, 495
 протяжки 497
 разделения переменных 180
 раздува 41
 сварки углов 421
 формования с помощью диафраг-
 мы 17
 «холодного» формования 420
 экструзии с раздувом 210, 220
 экструзионный 213
 Механизм
 впрыска 357 сл.
 диспергирования 109
 коленчато-рычажной 355
 плавления пленочный 128, 129,
 130
 пластикации 357 сл.
 смыкания 354 сл., 356

Механоформование 16
 Мешалки 97
 Многопозиционные машины 430, 437
 Модель
 двухчервячного экструдера 168
 двухэлементная 29
 линейная 29
 Лисерсича 240
 одномерная 20
 проточного реактора 149
 Модуль
 сжимаемости 298
 упругости 29, 33, 62, 241
 Мощноcть
 впрыска 359
 при измельчении 114
 нагрева 411, 412
 нагревательных элементов 152
 потребляемая экструдером 124,
 137 сл.
 пресса 374
 привода 154, 155, 191, 192, 357,
 450
 удельная 155
 электродвигателя 375
 Мультипликаторы 374, 375
 Мундштук 195, 198, 199, 203, 204,
 208, 213, 223, 226
 Мюллера — Энгелера уравнение 32

 Набухание 84, 455
 Нагрев
 диссипативный 156
 контактный 16
 поршневой 250
 теплорадиационный 16
 токами высокой частоты 101
 Нагреватели 119, 447
 индукционные 157, 412
 инфракрасные 421
 сопротивления 157
 токами высокой частоты 248
 электрические 411
 Накопители 467, 478, 479
 Намотка 17, 18, 487, 488, 491
 Намоточное устройство 467
 Нанесение покрытий 18, 452 сл.
 валками 463
 под давлением 464
 на каландрах 478
 косвенным способом 454
 «мокрым» способом 455
 разбрызгиванием 465
 раклями 461
 ротационным способом 464
 фильтрационным способом 464
 Наполнители 17, 54, 55, 82, 379, 401,
 403, 406, 470, 506
 волокнистые 34, 60, 350, 481
 древесные 347
 инертные 54

Наполнители
 порошкообразные 34
 рулонные 483
 стекловолокнистые 110, 482

Напряжения
 внутренние 306, 353, 431
 касательные 25, 294
 контактные 118
 нормальные 294
 однородные 24
 остаточные 238, 292
 сдвига 43, 45, 46, 58, 65, 72,
 74—77, 113, 114, 148, 164, 297,
 455, 469
 текучести 26

Напыление 17, 487, 488, 490

Нарезка 150, 165, 193, 221

Насосы 360, 374—376

Нелинейно-вязкие среды 311

Ньютоновские жидкости 11, 26, 25,
 72, 74—77

Ньютона закон 25

Ньютоновские жидкости 25, 26, 44,
 45, 48, 72—79, 134, 141, 485,
 486, 493

Ножи 206, 420

Ножницы гильотинные 99

Обкладывание 16

Облой 214, 227, 228, 263, 406

Оболочки вращения 422, 491

Оборудование 18, 269
 для диспергирования 112, 456
 для измельчения 99 сл.
 литьевое 244
 подготовительного производства
 79 сл., 93 сл., 100 сл.
 для получения объемных изделий
 210
 для смешения 93 сл.
 для термоформования 417
 для формования листовых тер-
 мопластов 434

Объемная упругость 298

Объемные изделия 209 231,
 241 сл.

Однопозиционные машины 436, 437

Одночервячные экструдеры 119

Ориентация 241, 292, 427
 наполнителя 70, 71
 трехмерная 70
 частиц при измельчении 113

Оснастка 14

Оствальда-де-Виле уравнение 28

Осциллограммы 305

Отверждение 13, 15, 49, 50, 54, 250,
 252, 254, 258, 267, 268, 271,
 340* сл., 387, 499, 503, 510

Отжиг 211

Отжим 68

Отходы производства 99, 106, 214,
 215, 259, 260, 266

Охлаждение 158, 206, 229, 269, 287,
 291, 351, 452, 479, 507

Параметр однородности толщины 235

Пасты 81, 83, 84, 453, 457, 458, 461,
 469

Пекле критерий 149

Пенопласты 81, 429

Перемешивающие устройства 94, 95,
 97

Пигменты 82, 100, 458, 461, 470

Пилы 99

Пирсона критерий 87

Питатели 94, 123, 142

Пневмоформование 10, 16, 427, 428

Планка постоянная 35

Пластизоли 452, 453, 455, 458

Пластикационные устройства 119, 237,
 260

Пластикация 13, 115, 245, 252, 253,
 461, 468, 470 сл.

Пластификаторы 81, 82, 453, 457,
 468, 470

Пластическая вязкость 26

Плато вязкости 49, 53, 54, 56, 57,
 343, 346, 347

Пленки 161, 196, 197, 205 сл., 421,
 454, 460, 465, 468, 473, 477, 480

Пленкообразование 453, 465, 466, 478

Пленочный режим плавления 116

Плотность 210, 264
 бимоминального распределения 86
 наполнителей 485
 отливок 337
 пробки 131
 расплава 132, 343

Плунжеры 368

Полиакрилаты 37, 242, 351, 360, 121,
 451, 452, 460

Полиамиды 14, 37, 159, 337, 350, 351,
 373

Поливинилацетат 452, 460, 505

Поливинилиденхлорид 460

Поливиниловый спирт 460, 489

Поливинилхлорид 14, 15, 32, 155,
 159, 160, 192, 194, 201—207,
 242, 275, 350, 351, 360, 373,
 421, 451, 452, 462, 470, 478,
 480, 498

Полиизобутилен 32, 37, 489

Поликарбонаты 14, 32, 37, 201, 350,
 351, 360

Полипропилен 69, 71, 193, 195, 202,
 207, 287, 350, 351, 421, 431, 432

Полистирол 15, 32, 38, 159, 201, 202,
 205, 287, 292, 307, 335, 350,
 351, 360, 431, 460, 468

ударопрочный 81

Политетрафторэтилен 32

Полиуретаны 350, 351, 452, 458, 468, 498
 Полиформальдегид 14, 350, 351, 360, 421, 432
 Полиэтилен 155, 159, 161, 194, 195, 202, 205, 206, 214, 242, 302, 308, 350, 351, 360, 421, 431, 432, 451, 452, 458, 461, 502
 Полиэфиры 16, 351, 352, 388, 461, 486—488, 498, 510
 Постоянная
 Планка 35
 Стефана — Больцмана 447
 Поддулканнизация 245, 246, 267, 271
 Подготовительное производство 79 сл.
 Подпитка 337, 338
 Подпрессовка 386
 Показатель
 текучести расплава 39, 40, 195, 210, 214
 флуктуации 163
 Покрытия 208, 209
 Помол 100
 Пористость 84, 264, 320, 321, 323, 326, 327, 341, 494
 Поршневая экструзия 15
 Поток
 вынужденный 175, 180
 обратный 173
 прямой 173
 утечек 135, 136, 137, 175, 182, 184, 186, 193
 циркуляционный 173, 174
 Предварительный подогрев 10, 12, 248, 249, 366, 381, 390, 396
 Предел текучести 26, 446, 450
 Пресс-инструмент 309
 Прессование 10, 15, 17, 101, 365 сл., 481
 инжекционное 493
 компрессионное 385
 литьевое 15, 396, 403
 профильное 379
 прямое 387, 396, 403
 Прессы 15, 258
 вертикальные 377
 с выносными пресс-формами 381
 гидравлические 366, 367
 гидромеханические 366
 с дифференциальными плунжерами 368
 кассетные 381
 классификация 366
 колонные 366
 литьевые 248
 механические 366
 многоосточные 366
 для профильного прессования 379 сл.
 рамные 366
 угловые 376 сл.

Прессы
 с шиберным питателем 381
 челюстные 366
 этажные 259, 367, 377
 Прессы-автоматы 381 сл.
 Пресс-формы 387, 388, 397, 400—411
 Прибыль 228
 Приводы
 вальцов 471
 гидравлических насосов 374
 групповые 377
 индивидуальные 377
 каландров 474
 насосно-аккумуляторные 376
 насосные 360
 рабочих органов 360
 червяка 119
 экструдера 152
 Приводная станция 467
 Приемные устройства 217, 236 сл.
 барабанного типа 205
 гидравлические 238
 горизонтальные 219
 двухпозиционные 217, 236
 с книжным смыканием 238
 многопозиционные 14, 237, 238
 однопозиционные 236, 237
 с плоскопараллельным смыканием 238
 пневматические 238
 пневмомеханические 238
 расчет 242
 ротационные 219, 238
 роторные 219, 238
 с шарнирным смыканием 238
 Пристенное скольжение 55, 58, 295
 Пристенный слой 61, 62, 64, 66, 69, 115
 Пробка 125, 128
 Порошкообразное движение расплава 59, 115, 118
 Прогиб валков 474
 Производительность 14, 44
 вакуум-насоса 451
 зоны дегазации 151
 — дозирования 133 сл.
 — загрузки 123, 124, 125
 каландров 473
 компрессора 451, 452
 литьевого формования 253
 литья под давлением 248, 276
 насоса 375
 объемная 72, 74, 75, 77—79, 198
 пластикационная 359
 пресса 366, 367
 пресс-автомата 382
 раздувных машин 216, 219
 роторных машин 217
 смесителей 82
 формовочных машин 437

- Производительность
 червячных пластикаторов 268, 275
 экструдеров 119, 122, 123, 135, 136, 141, 153, 154, 159, 162, 163, 166, 183, 184 сл., 215
 Промазка 16
 Пропитка 18, 80, 453, 482, 485, 488, 490, 493
 Противоток 135, 136
 Протяжка 18
 Профили 160, 197, 202 сл., 432, 497
 Профилирующий инструмент 14
 Прямой поток 135, 136
 Псевдопластичная жидкость 26, 27, 72—79, 131, 138, 294
Пуазейля уравнение 48
Пуассона коэффициенты 33, 62, 147
- Работа**
 внешних сил 304, 305
 впрыска 359
 измельчения 111
 прессования 365, 375
 формования 449
- Рабочие характеристики червяка 141, 163, 185
 Разбухание экструдата 238
 Раздувание «свободное» 230, 231
 Раздувные агрегаты 216—219
 Размоточная станция 467
 Разнотолщинность 239
 Ракли 461
 Распределители 361—363
 Расчет
 зоны плавления 130
 изотермического течения 72
 процесса формования 437 сл.
 раздувного агрегата 242 сл.
 раздувных изделий 235
 усилия смыкания 243
 экструзионных головок 198
- Реактопласты 48 сл., 53, 55, 118, 141, 143, 244, 245, 248, 264, 317, 340, 348, 350, 360, 365 сл.
- Режим**
 автогенный 142
 адиабатический 141
 вибрационный 303, 304, 317
 гибки листовых заготовок 420
 «голодного питания» 122
 изотермический 141
 квазистационарный 314, 315, 333
 литья под давлением 350 сл.
 политропный 141
 регулярный 318, 324
 струйный 318, 323, 353, 464
 температурно-временной 329, 486
 температурный 159, 162
 формования 489
- Резиновые смеси 48 сл., 244, 245, 248, 250, 264
Рейнера уравнение 28
Рейнольдса число 86
 Релаксация напряжений 262
 Реологические уравнения 27, 34, 66
 для Бингамовских сред 26
 дифференциального типа 29
 интегрального типа 30
 на основе молекулярной теории 30 сл.
 Реометры 40, 42
 Реопектическая жидкость 27
 Роботы 19
 Ручьи 225
- Самоочистка червяков 165
 Сварка 18, 211, 421
Свейнгера мера 23
 «Сверханомалия» вязкости 57
 Свободный объем 36, 250
 Связующие 16, 17, 379, 452, 453, 460, 461, 471, 481, 482, 488, 493
- Сдвиг** 22, 24
 одноосный 89
 октаэдрический 147, 148
 плоскопараллельный 70
 простой изотермический 26
 фазовый 312
- Серво-распределители 362
 Сетка 60, 62
 «Сило-скоростная характеристика» 322, 323
- Склеивание 18, 211
 Скорость 254, 256, 364
 впрыска 364
 движения пробки 132
 — расплава 334
 деформации 27, 295
 диффузии 85
 заполнения формы 287, 310, 319
 нанесения покрытия 463
 отбора пленки 206
 отверждения 341, 379, 391
 охлаждения 211
 плавления 129, 132, 155
 потока 73, 75, 76, 77, 78
 — в винтовых каналах 176
 — вязкой жидкости 168
 — в смесительном элементе 149
 пристенного скольжения 54, 59, 325
 продольного течения 25
 сдвига 25, 27, 72, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 140, 146, 198, 327, 463
 течения 44, 344, 347, 326
 угловая 178
 удара при измельчении 111
- Скорчинг 245
 Слоистые пластики 367, 378, 432, 468

Смесители 80, 81

- автоматические 93
- барабанные 94, 95, 96
- быстроходные 93
- валковые 98
- вибрационные 98
- горячего смешения 96, 97
- гравитационные 93
- двухроторные 98
- двухстадийные 96
- динамические 93
- закрытого типа 94, 98, 471
- непрерывного действия 93, 96, 99, 472

- с перемешивающим устройством 93, 95

- пересыпные 94

- периодического действия 96

- пластикаторы 99, 472

- пластикаторы 99, 472

- пневматические 94

- полуавтоматические 93

- ручные 93

- сдвиговые 93

- скоростные 96, 470

- со смесительным конусом 472

- статические 93

- типа «Ко-кнеттер» 93, 97, 99

- тихоходные 93

- универсальные 93

- центробежные 96, 97

- циркуляционные 455

- червячные 472

- экструзионные 472

Смешение 10, 80, 81, 148, 455, 456, 461, 506, 507

- бездиффузное 85

- вязких жидкостей 84 сл.

- горячее 469

- диспергирующее 85

- диффузионное 93

- жидкости 90

- идеальное 85

- в канале червяка 136

- конвективно-диффузионное 93

- конвективное 93

- ламинарное 86, 89

- в одночервячном экструдере 143

- при произвольной деформации сдвига 91

- простое 85

- сухое 96, 468

- сыпучих материалов 84 сл., 87

- турбулентное 85, 89

- холодное 469

Смешивающие дозаторы 94

Смятие 99

Сплошная среда 21

Стабилизаторы 13, 81, 82, 470

Стекловолокнит 62, 67, 68

Стеклопластики 13, 16, 18, 492

Стойкость к растрескиванию 210, 211

«Степенная» жидкость 45, 47

Степень

- анизотропии 306

- вулканизации 49, 53, 254, 276

- вытяжки 422, 423, 430

- диспергирования 106

- «дросселирования» 135

- завершенности процесса 319

- измельчения 106, 109

- компрессии 156

- конверсии 155

- наполнения 54

- смещения 85, 86, 87

- ориентации 211, 292, 306, 307

- отверждения 49, 50, 53, 254, 352, 390, 392

- псевдопластичности 380

- сжатия 116, 117, 121, 156, 163, 191, 192

Суспензии 54, 55, 84, 60

Сушилки 12, 466—468, 478

Сушка 10, 12, 80, 350, 452, 465 сл.

Сшивание 82, 504, 510

Таблетирование 10, 11, 28, 80, 100, 381

Таблеточные машины 101—105

Тадмора уравнение 28

Температура

- на входе в форму 256, 257

- кристаллизации 251, 287, 292, 332

- литья 287, 351

- плавления 128, 306

- стеклования 31, 36, 251, 263, 287, 292, 306, 332, 334

- в формующем инструменте 194

- формы 229, 287, 351, 389, 390

- в цилиндре 194

Тензор

- деформации 21

- единичный 29

- изотропный симметричный 29

- Коши 30

- напряжений 24, 27, 29

- скоростей деформации 28, 29

- Фингера 30

Теплоносители 411, 412, 458, 475

Термодеструкция 245, 268, 275, 308

Термообработка 156, 157

Термопласты 111, 160, 194, 211, 231,

- 244, 245, 251, 268, 287, сл., 296,

- 350, 414 сл.

Термостатирование 156, 248, 286, 424

Термоформование 417

Течение 25

- между бесконечными пластинами 131

- волокнистой суспензии 62

- волокнистых композиций 64

- вязкое 26, 41, 59

Течение

- изотермическое 72, 291, 316
- коаксальное простое сдвиговое 29
- в конфузорах 70
- композиционных материалов 66
- куэттовское 29
- ламинарное 134, 332
- наполненных полимеров 34
- неизотермическое 67, 137, 291, 316
- обратное 171
- одномерное 299
- между параллельными пластинками 332
- в переходной зоне 177
- через плоскую щель 43 сл.
- прямое 171
- через цилиндрический канал 46 сл.
- сдвиговое 59, 297, 325
- «стержневое» 62
- в сужающихся конических каналах 68
- трехмерное 70
- установившееся 131
- Тиксотропия 298, 505
- Тиксотропная жидкость 27
- Тиснение 16, 422, 452, 479
- «Толщина полос» 89, 90, 92, 145, 147, 149
- Торпеда 149, 150, 200, 250, 278, 279, 282
- Трансверсально-изотропные материалы 481, 486, 491
- Транспортеры 94
- Трение 369, 374
- Трубы 160, 194, 197, 202 сл., 208, 220, 421, 432, 491, 497
- Трутона уравнение 42
- Трутоновская вязкость 25
- Турбулентность 85, 89

Удельные энергозатраты 154

Удельный объем 337, 359

Уплотнения 12, 369, 372, 483

Уравнения

- Вильямса — Ферри 36, 37
- движения 134, 177, 182, 289, 333, 494, 496
- кинетики уплотнения 320, 328
- максвелловской жидкости 29
- материального баланса 132
- наследственной среды 443
- нелинейной вязкости 20
- неразрывности 20, 177, 178, 289, 326, 333, 494, 496
- нормального логарифмического распределения 108
- объемного состояния 298
- для простого растяжения 25
- — сдвига 25

Уравнения

- процесса диспергирования 109
- расхода через круглый канал 59
- для расчета мощности привода 190
- — производительности 190
- реологические 20, 66, 288, 289, 342
- сжимаемости 343
- сило-скоростной характеристики 323
- скорости потока в прямоугольном канале 309, 312
- состояния 334, 343
- степенное 28
- теплопроводности 127, 282, 340, 342, 333
- течения пористого материала 328
- энергетического баланса 137
- энергии 279
- Усадка 235, 255, 262, 292, 303, 306, 338, 343, 351, 353, 388, 499
- высокоэластическая 307
- объемная 211, 511
- продольная 308
- Усилие
- вырубки 434
- вытяжки 431
- запирания формы 336
- измельчения 111
- на литевом плунжере 260
- прессования 104, 366, 369, 402, 403, 404
- распорное 303, 462
- смыкания 243, 342, 349, 493, 496
- Устройства
- гранулирующие 200
- для загрузки 383
- охлаждающие 205, 479
- приемное см. Приемные устройства
- режущие 201, 205, 206
- тянущие 205, 206
- Утечки 186, 370, 371, 375, 462
- Фазовые переходы 287, 288
- Фактор
- набухания 457
- смещения 82
- Фенопласты 16, 50, 52, 55, 269, 322—324, 328, 346, 347, 351, 388, 390, 395, 403, 487, 488
- Фика закон 84
- Фильтрование 107, 456, 458
- Фингера тензор 30
- Формование 10, 80, 251 сл., 507 сл.
- вакуумное 422
- с водяной подушкой 433
- с воздушной подушкой 428
- вытяжкой 422
- гидравлическое 433

Формование

- двухстороннее 429
- из дисперсий 10
- интрузионное 255
- комплексное 16
- контактное 17, 487, 488, 489
- методом литья смол 498 сл.
- механизация 385
- механической вытяжкой 422
- негативное 16, 437, 441, 448, 450
- объемных изделий 210
- позитивно-негативное 441
- позитивное 16, 437
- с помощью диафрагмы 17
- с проскальзыванием в зажимной раме 430, 451
- раздувом сжатым воздухом 210
- из растворов 10
- ротационное 425, 426
- свободное 16, 437, 441
- термопластов 414 сл.
- холодное 431, 445
- центробежное 18

Формующий инструмент 119, 195 сл., 205, 220 сл., 417, 501

Формы 489

- «безлитниковые» 262, 264
- заполнение 13, 293
- компрессионные 258
- литьевые 14, 252, 354 сл., 501
- многogneздные 259, 260, 266
- одногнездные 266
- плунжерные 258, 259
- раздувные 218, 219, 227 сл.
- чистка 506

Фторопласт 370

Фторэластомеры 261

Функциональные зоны 148

Фурье критерий 151

Фурье уравнение 180

Хрупкие полимеры 106

Хрупкость 106, 352

Целлюлоза и ее производные 351, 406, 451, 452, 460, 498

Центробежное литье 488

Центробежное формование 509

Цикл

- литья 246, 252
- охлаждения 216
- пластичности 273
- прессования 366
- формования 216, 269

Циклограммы 252, 255, 256, 387, 395

Цилиндр 279

- с водяным охлаждением 161
- литьевой 407
- материальный 119, 157, 350
- нагревательный 301
- пластикационный 278, 302, 349

Цулаги 491

Частота вращения

- мешалки 470
- червяка 124, 152—155, 159—161, 181, 194, 268, 274, 357

Червяки 119, 120

- зацепляющиеся 166, 192
- конические 121, 133
- незацепляющиеся 166, 192
- сопряженные 180
- трехзонные 358
- цилиндрические 121

Число

- заходности нарезки 192
- заходов червяка 139
- зацеплений 192
- Лошмидта 35
- раздувных форм 216, 219
- Рейнольдса 86

Шаг нарезки 120, 155, 193, 221

Шенкеля уравнения 184

Шприцовочные пистолеты 465

Штамп 420, 424

Штамповка 16, 432, 433

Штранг-прессы 379

Щель 72, 73, 74

Эйнштейна уравнение 54

Эйринга — Прандтля уравнения 31

Экструдеры 94, 195 сл., 471

- автогенные 121
- вакуумирующие 121
- валковые 93, 99
- вертикальные 122, 124
- горизонтальные 122, 124
- двухступенчатые 121
- двухчервячные 99, 164
- дегазационные 150
- дисковые 93, 99
- компаундирующие 121
- с копильником 219
- одноступенчатые 121
- одночервячные 99, 148, 152 сл., 159
- с осциллирующим червяком 121
- узкоспециализированные полнотропные 121
- универсальные 121
- с функциональными зонами 148 сл.

Экструзия 10, 481

- в двухчервячных экструдерах 191 сл.

в одночервячных экструдерах 119

оптимизация 163

поршневая 15

с раздуванием 209 сл.

стекловолоконистой композиции 115

термопластов 119 сл.

Эластическая турбулентность 239
Эластомеры 360
Элементы
 диспергирующие 148
 дифференциальные сдвиговые 163
 смесительно-диспергирующие 156
 смесительные 148, 163
Электродвигатели 358, 359
Эллиса уравнение 28
Энергия
 активации вязкого течения 31, 32,
 35, 36, 67
 — отверждения 49
 деформации 31
 диссипации 83, 193
 межмолекулярных взаимодействий 30
 упругая 25
Энергозатраты
 на диспергирование 109
 при смешении 82, 84

Эпоксидные смолы 16, 61, 81, 353,
 487, 498, 502 сл.
Эффективная вязкость 133, 136, 178,
 187, 198, 227
Эффективная сжимаемость расплава
 324
Эффективный коэффициент переме-
 шивания 149
Эффективный модуль упругости 62
Эффекты
 аэродинамический 427
 входные 59
 запаздывания 294
 нормальных напряжений 41
 свободных поверхностей 40
 «срыва» 65
 тиксотропии 298

«Ядро течения» 62, 66, 71

ТЕХНИКА ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС

Николай Иванович Басов, Валентин Сен-Хакович Ким,
Юрий Васильевич Казанков, Владимир Кириллович Скуратов,
Виктор Васильевич Скачков, Виктор Алексеевич Миронов,
Игорь Иосифович Фелипчук, Кирилл Аркадьевич Салазкин,
Валерий Анатольевич Любартович, Михаил Анатольевич Шерышев,
Михаил Семенович Макаров
Вернер Брой, В. Бургхардт, Дитер Каспар, Фриц Эндлер,
Ханс-Дитер Фишер, Ханс Краузе, Хартмут Шифер,
Альбрехт Шименц, Вальдфрид Шуберт

*Редактор Л. И. Галицкая
Художник Б. А. Котляр
Художественный редактор К. К. Федоров
Технический редактор В. М. Скитина
Корректор О. Е. Иваницкая*

ИБ № 1444—1445

Сдано в набор 29.05.84. Подп. в печ. 1.10.84. Т-18673. Формат бумаги 60×90^{1/8}. Бумага тип. № 1. Гари. литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 33,0. Усл. кр.-отт. 33,0. Уч.-изд. л. 35,97. Тираж 6800 экз. Заказ № 181. Цена 2 р. 80 к. Изд. № 2592.

Ордена «Знак Почета» издательство «Химия».
107076, Москва, Стромынка, 21.

Московская типография № 11 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, 113105, Нагатинская ул., д. 1.