

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ

ЛЕБЕДЕВ О.В., ПОНОМАРЕВА О.М.

Т Р И Б О Т Е Х Н И К А

Издательство ТАДИ

Ташкент – 2010

УДК. 621.891+539.538

Печатается по постановлению Ученого Совета
Факультета «Автомобилестроение» ТАДИ
(протокол № 4 от 12 декабря 2007 г.)

Учебное пособие обсуждено и утверждено на заседании
кафедры «Технология автомобилестроения»
(протокол № 13 от 1 декабря 2007 г.)

Учебное пособие рассчитано на студентов механических факультетов ВУЗов, магистрантов, аспирантов, научных сотрудников и инженеров, специализирующихся в области трибологии.

Рецензенты:

д.т.н., проф. Аскарходжаев Т.И.

д.т.н., проф. Шарипов К.А.

ISBN 978-5-217-03463-6

© Ташкентский автомобильно-дорожный институт

Предисловие

Никакие конспекты, конечно, не могут полностью воспроизвести содержание учебного пособия, стиль авторов, лаконичные четкие формулировки.

Однако на основании записей лекций можно сравнительно точно передать структуру курса, научные концепции авторов и методы рассмотрения задач триботехники.

Фундаментальные научно-методические проблемы, стоящие перед трибологией затрагивают научные основы сразу нескольких фундаментальных и прикладных наук.

Триботехника является исключительно динамично развивающимся направлением современной науки, техники и технологии, определяющим достижения современного машиностроения.

Материалы учебного пособия построены так, чтобы отразить основные разделы триботехники такие как общие вопросы износостойкости при трении, конструктивные и технологические методы, повышения долговечности трущихся деталей, а также вопросы эксплуатации машин, связанные с обеспечением износостойкости деталей.

В связи с развитием в Узбекистане автомобильной отрасли, в последние годы, триботехнике стало уделяться повышенное внимание.

По совету рецензентов были введены некоторые дополнения, которые не всегда излагались в лекциях из-за нехватки выделенного по учебному плану времени.

От авторов

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
	7
1.	11
2.	14
3.	22
3.1.	23
3.2.	25
3.3.	29
3.4.	32
3.5.	43
3.6.	52
4.	54
5.	63
6.	69
6.1.	69
6.2.	70
6.3.	73
6.4.	76
6.5.	76
6.6.	78
6.7.	80
7.	84
8.	97
8.1.	97
8.2.	99
8.3.	101
8.4.	102
9.	105
10.	113
10.1.	

	износостойкости	113
10.1.1.	Принципы конструирования подшипниковых узлов	113
10.1.2.	Влияние параметров дизелей на износ пар трения	116
10.1.3.	Податливость элементов системы приводов машин	123
10.2.	Технологические способы повышения износостойкости	128
10.2.1.	Применения лазерных установок в трибологии	128
10.2.2.	Свойства лазерного излучения	131
10.2.3.	Методы генерации лазерных импульсов	133
10.2.4.	Характеристики лазерного излучения	135
10.2.5.	Взаимодействие лазерного излучения с обрабатываемыми материалами	136
10.2.6.	Лазерная наплавка порошка на железной основе	138
10.2.7.	Возможности лазерного зажигания топливных смесей	139
10.2.8.	О формировании наноструктур при лазерном оплавлении	140
10.2.9.	Химико-термическая обработка (ХТО)	142
10.2.10.	Применение финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) поверхностей детали	143
10.2.11.	Ионно-плазменные методы	144
10.2.12.	Плакирование	145
11.	Кластеризация поверхности трения.	148
12.	Нанотехнологии – проблемы развития и индустрия наносистем	153
12.1.	Научные основы нанонауки	153
12.2.	Обобщенные модели в наномеханике	160
12.3.	Наномасштабный фактор в трибологии.	163
13.	Технологические аспекты получения и применения деформируемых наноматериалов.	166
14.	Эффект Ребиндера в трибологии	174
15.	Поведение и устойчивость искусственно возбужденных трибосистем	177
16.	Прогнозирование износостойкости трибосопряжений по изменениям энтропии.	181
16.1	Общие понятия энтропии	181
16.2	Оценка работоспособности трибосопряжений.	184
16.3	Энтропийное значение погрешности	191
16.4.	О самоорганизации трибосистем	191
16.5	Системный анализ трибологических повреждений.	193
16.6	Определение зависимости между скоростью энтропии и интенсивностью отказов узлов трения.	195
16.7	О трещинах на поверхностях пар трения.	196

16.8	Определение работоспособности шестеренных узлов гидроприводов машин по показателям энтропии.	197
17.	Основы очистки рабочих жидкостей от механических загрязнений	202
17.1	Фильтрация рабочей жидкости при низких температурах	211
17.2	Установки для очистки масел на основе мембран	217
17.3	Анализ устройств для очистки жидкости, используемых на колесных машинах	220
18.	Моделирование процессов изнашивания по параметрам работающего масла	227
18.1	Постановка задачи оптимизации пары трения гидросистемы колесной машины.	229
18.2.	Математические основы измерения и анализа случайных динамических процессов	231
19.	Испытания трибосопряжений на машинах трения	240
19.1	Метод ускоренных испытаний трибосопряжений машин на износостойкость	244
20.	Триботехнологии XXI века в Узбекистане	252
	Приложение №1. Основные термины и определения, применяемые в триботехнике	261
	Приложение №2. Классификация видов трения, изнашивания, смазки, методов смазывания и смазочных материалов	268
	Приложение №3. Греческий алфавит	270
	Приложение №4. Девять правил эффективных исследований в триботехнике	271
	Приложение №5. Перевод внесистемных единиц измерений	272
	Приложение №6. Словарик по мобильной электронике	273
	Приложение №7. Дополнительная литература	274

ВВЕДЕНИЕ

За дату рождения трибологии как науки можно принять 1973 г., когда был проведен первый Европейский конгресс по трибологии. Как и всякая наука, трибология имела долгую предысторию.

Трибология-это наука о внешнем трении твердых тел и внутреннем трении твердых и жидких тел.

Трибология в комплексе рассматривает контактные зоны тел с единой и многообразной структурой, составом и состоянием.

Разработка обобщенных трибологических моделей имеет целью формирование целостного научного подхода к исследованию износостойкости и обусловленной ею надежности и направлена на развитие концепции трибологии как науки, исследующей взаимосвязанные механические, физические и химические аспекты поведения и развития трибосистем.

Трибологические модели используются для решения таких задач триботехники, как:

- подбор материалов пар трения и смазочных сред;
- прогнозирование интенсивности изнашивания узлов трения и процессов старения смазочных сред;
- прогнозирование надежности изнашивающихся элементов машин для различных областей техники;
- расчет процессов трения и смазки при решении прикладных задач;
- выбор упрочняющих технологий по критериям надежности, износостойкости и прочности.

Одной из важнейших проблем, стоящих перед машиностроением, является снижение материалоемкости конструкций при сохранении необходимой прочности и несущей способности, что непосредственно связано с использованием резервов применяемых материалов и широким внедрением в современную технику новых материалов.

Повышение усталостной прочности стали, применяемой в узлах трения, очень важно, так как реальные пары трения работают при совместном воздействии контактных и циклических нагрузок.

Изнашивание металла характеризуется двумя альтернативными направлениями: снижением износа контактирующих поверхностей в целях повышения надежности машин и механизмов и увеличением износа в процессах приработки и доводки поверхностей деталей машин, а также при интенсификации процесса диспергирования твердых тел.

Каждое из этих направлений осуществляется путем использования соответствующих жидких технологических сред: в первом случае смазок, во втором - присадок.

Значимость трибологии в последнее время значительно повышается. Она затрагивает самые различные сферы деятельности человека, но особую важность приобрела в связи с необходимостью повышения износостойкости

машин, приборов, оборудования, инструмента, рабочих органов и других изделий, а также снижения потерь на трение при их использовании.

На практике недостаточная износостойкость приводит к простоям машин по причине неработоспособности, чрезвычайно большой нагрузке основных производственных мощностей для изготовления запасных частей, гипертрофированно разросшейся сети ремонтных предприятий и мастерских.

Качество машин, механизмов, оборудования, приборов в значительной мере определяется ресурсом их работы, который недостаточен для большей части технических изделий, производимых сейчас и эксплуатируемых в народном хозяйстве Республики. Ресурс очень многих машин обусловлен низкой износостойкостью подвижных сопряжений и трущихся деталей.

В Республике остро стоит задача организации более широкого, межотраслевого производства подшипников скольжения и качения, так как это один из путей существенного повышения износостойкости машин.

Подвижные сопряжения машин прежде всего нуждаются в качественных материалах и совершенных технологиях их изготовления и упрочнения.

При этом речь идет о поверхностных слоях трущихся деталей машин, которые по массе составляют лишь несколько процентов от массы машины или изделия, но именно они определяют работоспособность многих видов машин.

Триботехническое материаловедение - основной путь реализации достижений теории фрикционного взаимодействия в повышении износостойкости машин и снижении в них потерь на трение.

Преобладающими материалами для пар трения машин и механизмов являются металлы и сплавы.

Из известных упрочняющих технологий большое внимание уделяется газо-термическим методам нанесения покрытий (газопламенному, электродуговому, плазменному, детонационному); различным химико-термическим методам модифицирования поверхностей; осаждению покрытий на газовой фазе (в том числе в установках, работающих по замкнутому циклу); поверхностному упрочнению пластической деформацией и взрывом; электроискровому упрочнению; различным методам лазерной обработки; нанесению покрытий вакуумными ионно-плазменными методами и модифицированию поверхностных слоев (имплантацией, ионным азотированием и цементацией и т.п.); нанесению композиционных электролитических покрытий; наплавке и контактной приварке износостойких материалов; получению износостойких биметаллов и т.п.

Более широко и эффективно применяются различные технологические методы повышения износостойкости деталей машин в ремонтном производстве.

Слаба унификация смазочных материалов. В настоящее время трибология признается жизненно важной для машиностроения. Она стала одной из немногих технологий, которая определяет конструкцию многих механизмов.

Вследствие быстрых изменений и технически усложняющихся требований, а также зависимости механических систем от трибологических знаний, трибология превратилась в стратегическую науку.

В трибологии можно выделить в настоящее время четыре вида направлений исследований, актуальных для Республики Узбекистан:

- функциональная надежность в трудных условиях эксплуатации;
- экономические затруднения;
- сложные условия окружающей среды;
- триботехническое материаловедение.

Износ - это форма поведения материала при контакте поверхностей твердых тел, находящихся под нагрузкой и движущихся относительно друг друга.

Износ может возникать вследствие непрерывного удаления с поверхностей продуктов реакций (например, окислов) или из-за локального перенапряжения одного или обоих контактирующих тел под действием нормальных и касательных сил трения.

Когда один твердый материал скользит по другому, на контактирующих поверхностях в результате трения выделяется тепло, и происходит их износ. В общем случае, как износ, так и рассеиваемая при трении энергия нежелательны.

Чтобы уменьшить износ, необходимо понять его основной механизм и последствия. Однако получить точное количественное выражение для определения износа очень трудно вследствие воздействия таких факторов, как макро- и микроскопические свойства материалов, режим эксплуатации и условия окружающей среды.

Когда неровности шероховатых поверхностей вступают в контакт друг с другом при относительном движении, вследствие трения выделяется тепло. В результате этого возрастает локальная температура, а на поверхностях и в их поверхностном слое образуются поля тепловых напряжений. Поэтому контактные напряжения включают в себя также и локальные тепловые напряжения, а локальные механические свойства с повышением температуры, изменяются.

Предмет трибологии базируется на трех законах трения:

Первый закон трения заключается в том, что трение не зависит от номинальной площади касания между телами.

Например, если тащить по столу кирпич, то независимо от того, лежит ли он плашмя, на боку или на торце, сопротивление движению будет одинаковым.

Второй закон заключается в том, что сила трения пропорциональна нагрузке на скользящее тело.

Если взять стопку из четырех кирпичей, то сила трения возрастает в четыре раза. Это означает, что для данной пары поверхностей отношение силы трения к нагрузке неизменно. Это отношение называется коэффициентом трения.

Кулон доказал, что трение скольжения значительно меньше трения покоя и установил, что трение скольжения почти не зависит от скорости. Это положение называют третьим законом трения.

1. Основные представления о контактировании соприкасающихся поверхностей и трении

Явления трения и изнашивания взаимно обусловлены: трение приводит к изнашиванию, а изнашивание поверхностей деталей в ходе работы приводит к изменению трения.

Установлено, что из-за износа и плохой регулировки теряется около 15% мощности двигателя. Простои автомобилей из-за технических неисправностей в среднем автохозяйстве достигают 30-40% календарного времени.

Трудозатраты за срок службы автотранспорта распределены таким образом: 1,4% на изготовление; 45,4% - на техническое обслуживание; 46% - на текущий ремонт; 7,2% на капитальный ремонт.

Прикладными задачами по повышению износостойкости и управлению трением за счет применения новых конструкций узлов, материалов и эксплуатационных приемов занимается триботехника.

Считается, что основными направлениями работ по существенному повышению эксплуатационных свойств транспортных средств на основе использования трибологии являются следующие:

1. Совершенствование конструкции узлов трения транспортных машин, снижение материалоемкости, веса, повышение надежности и ресурса;
2. Применение новых материалов и технологий для повышения износостойкости и несущей способности пар трения;
3. Разработка и применение смазочных материалов четвертого и пятого поколения;
4. Использование экологически чистых методов эксплуатации;
5. Совершенствование конструкций уплотнительных устройств.

В технике трение является инициатором деформационных, динамических, тепловых, акустических, электрических, адгезионных и других процессов, определяющих ресурс работоспособности узлов трения машин, их энергетику и эффективность.

Первичной проблемой при изучении трения является контактирование соприкасающихся поверхностей.

В основе представлений о фрикционном взаимодействии шероховатых поверхностей лежит понятие о площади соприкосновения трущихся тел.

Износ пропорционален объему взаимного внедрения шероховатостей, зависящего от свойства материалов, нагрузки, смазки, параметров шероховатости и др.

Под трением понимают сопротивление, возникающее при перемещении одного тела относительно другого, прижатого к первому. Различают трение покоя, скольжения и качения.

Механизм возникновения трения объясняет молекулярно-механическая теория трения, в разработку которой внесли большой вклад Дерягин Б.В., Крагельский И.В., Боуден Ф.П., Тейбор Д., Томлинсон и др. В

соответствии с этой теорией трение имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Силу трения можно представить как сумму молекулярной (адгезионной) и механической (деформационной) составляющих:

$$F_{mp} = F_{ад} + F_{деф}$$

Молекулярная составляющая обусловлена сопротивлением разрыву молекулярных либо межатомных связей, которые возникают между контактирующими телами.

Механическая составляющая вызвана сопротивлением упругому и пластическому оттеснению выступов контактирующих тел, внедрившихся при движении в контрповерхности.

Для металлов деформационная составляющая коэффициента трения примерно в 100 раз меньше, чем адгезионная. Поэтому коэффициент трения в первом приближении равен адгезионной составляющей.

Зависимость коэффициента трения f от скорости скольжения v предложена Крагельским И.В. в следующем виде:

$$f = (a + bv)e^{-cv} + d$$

где a , b , c , d – параметры, характеризующие режим скольжения и свойства материалов пары трения.

Параметр (a) зависит от физических свойств материалов и шероховатости, (b и c) зависят от вязкости и нагрузки, (d) зависит от конструкции узла трения и режима скольжения. Как видно, влияние скорости на свойства контакта при небольшом её изменении само по себе невелико.

Узлы трения машин всегда подвергаются динамическим воздействиям. В транспортных машинах вибрации и удары поступают от контакта с дорожным полотном; от работающего двигателя, а также от воздействия самовозбуждающихся колебаний на элементах корпуса, рамы, системы управления и др.

Для надежного разделения поверхностей трущихся деталей в условиях граничной, гидродинамической и эластогидродинамической смазки служат смазочные материалы. Одновременно они снижают силу трения, интенсивность изнашивания, а также демпфируют удары и вибрации. Важнейшим показателем является смазывающая способность, т.е. способность создавать на поверхности детали тонкую защитную пленку препятствующую непосредственному контакту, а следовательно, адгезии, задиру и заеданию.

В технике масла считаются ньютоновскими жидкостями и поэтому сила трения в смазочном слое имеет вид

$$F_{mp} = \eta \frac{dv}{dz} \cdot S,$$

где η - динамическая вязкость масла;

V - скорость скольжения;

Z - толщина смазочного слоя;

S – площадь, на которой происходит сдвиг слоев смазки.

Для оценки служебных свойств масла с учетом влияния температуры на вязкость используется индекс вязкости **И**:

$$И = \frac{v_0 - v}{v_0 - v_m} \cdot 100$$

где v_0 - кинематическая вязкость худшего нефтяного масла при 40°C, у которого вязкость сильно падает с ростом температуры;

v_m - вязкость при 40°C лучшего рафинированного масла, у которого вязкость слабо зависит от температуры;

v - вязкость испытуемого масла при той же температуре.

Если $v = v_m$, то $И=100$. Следовательно, все смазки имеют индекс вязкости в интервале от 0 до 100.

Вопросы по теме:

1. Понятия трения и изнашивания
2. Чем занимается триботехника?
3. Понятие износа.
4. Молекулярно-механическая теория трения.
5. Динамические воздействия на узлы трения.
6. Назначение смазочных материалов
7. Определение индекса вязкости.

Вопросы по самостоятельной работе

1. Методика расчета подшипников качения при статическом нагружении
2. Классификация подшипников качения
3. Проверка параметра режима смазки подшипника качения.

Литература

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М., Машиностроение, 1989, с. 328
2. Лебедев О.В., Кадыров С.М. Цикл лекций по трибологии. Т., Укитувчи, 1995, с. 128
3. Лебедев О.В., Кадыров С.М. Основы трибологии. Т., изд. ТАДИ, 2000, 176 с.
4. Лебедев О.В., Турсунова Г.Х. Методические указания по выполнению курсовой работы. Т., изд. ТАДИ, 2008, с. 34
5. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машины. Справочник. М., Машиностроение, 1983, с. 320

2. Анализ контактирования и оценка площади соприкосновения

В результате изнашивания деталей понижается мощность двигателя, увеличивается расход топлива и смазочных материалов, возникают недопустимые шумы при работе механизмов, а при изнашивании деталей рулевого управления и подвески автомобиля ухудшается его управляемость и снижается безопасность движения.

Опыты показывают, что при трении (как сухом, так и со смазкой) изнашивание одного и того же материала может изменяться в тысячу раз в результате небольшого изменения внешних условий без заметного изменения работы трения. Степень изнашивания, например, в большой мере зависит от изменения скорости на поверхности трения.

Поверхностный слой в результате обработки приобретает комплекс характерных свойств, объединяемых общим понятием качества поверхности.

Различают следующие погрешности обработанной поверхности: макрогеометрические отклонения, волнистость и шероховатость; микрогеометрические отклонения – отклонения действительной формы поверхности от идеальной, заданной конструктором.

Волнистостью поверхности называют совокупность более или менее регулярно чередующихся возвышенностей и впадин с шагами волны в продольном направлении значительно превышающими её высоту.

Шероховатостью называют неровности, образующие в совокупности рельеф поверхности. Эти неровности – выступы и впадины, с относительно малым расстоянием между ними (около 1 мкм и менее) образуются на поверхности детали в процессе обработки.

При случайном расположении шероховатостей на поверхностях контактирующих тел контактное сближение этих тел под действием внешней нагрузки лимитирует фактическая площадь соприкосновения, определяемая геометрией контактирующих поверхностей.

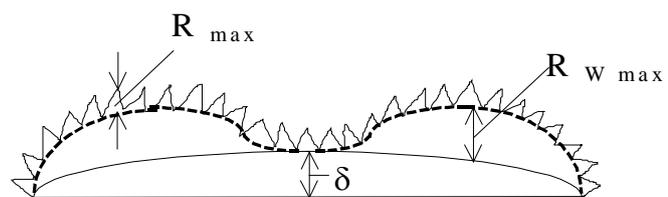
На рис. 2.1 показаны основные характеристики геометрии шероховатых поверхностей: шероховатость с максимальной высотой профиля R_{max} , волнистость с максимальной высотой волны R_{wmax} и макроотклонения от горизонтальной базовой плоскости с размером δ .

Для оценки шероховатости используются: оптические, щуповые, электронно-микроскопические и другие методы. Промышленное применение приобрел щуповой метод.

Суть его заключается в том, что по поверхности скользит игла с радиусом закругления 2-10 мкм, значительно меньшим, чем радиус закругления вершин икронерывностей.

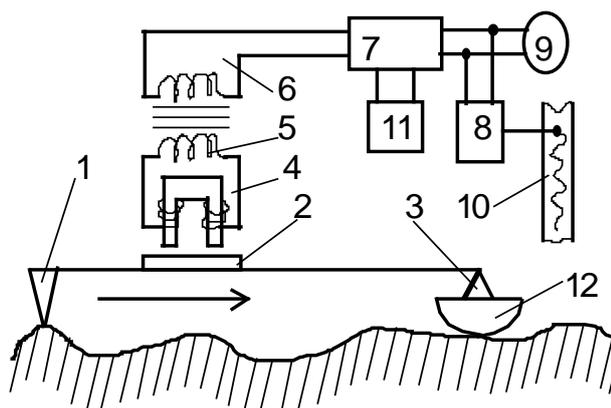
Колебания иглы в

вертикальном направлении преобразуются в электрические сигналы,



Р и с. 2.1. Основные характеристики геометрии шероховатых поверхностей

поступающие в микропроцессор, который выдает в цифровом виде основные характеристики профиля.



Р и с. 2.2. Схема профилографа

На рис. 2.2 изображена схема современного профилографа. Игла 1 скользит по шероховатой поверхности и вместе с якорем 2 поворачивается относительно призмы 3, в результате чего меняется зазор между якорем 2 и сердечником 4, что генерирует переменный сигнал в катушках 5 и 6, который усиливается блоком 7 и регистрируется на ленте 10 самописца 8, а также стрелочным прибором 9. Микропроцессор 11 предназначен для вычисления стандартных показателей микрогеометрии, которые высвечиваются на цифровом табло. Для исключения влияния волнистости призма прибора прикреплена к шаровой опоре 12. Шаровая опора обеспечивает скольжение по вершинам микровыступов, огибая волны, поскольку если опора будет скользить по плоской гладкой поверхности, то одновременно будут записываться шероховатость и волнистость (см. рис. 2.1). Прибор позволяет изменять в широком диапазоне масштаб увеличения (до 100000 раз).

В последние годы разработаны методы получения профилограмм на растровом, электронном и сканирующем (туннельном) микроскопах. Разрешение в этом случае достигает нанометров. Удастся регистрировать шероховатость молекулярных размеров (субмикрощероховатость), а также микродефекты кристаллической структуры.

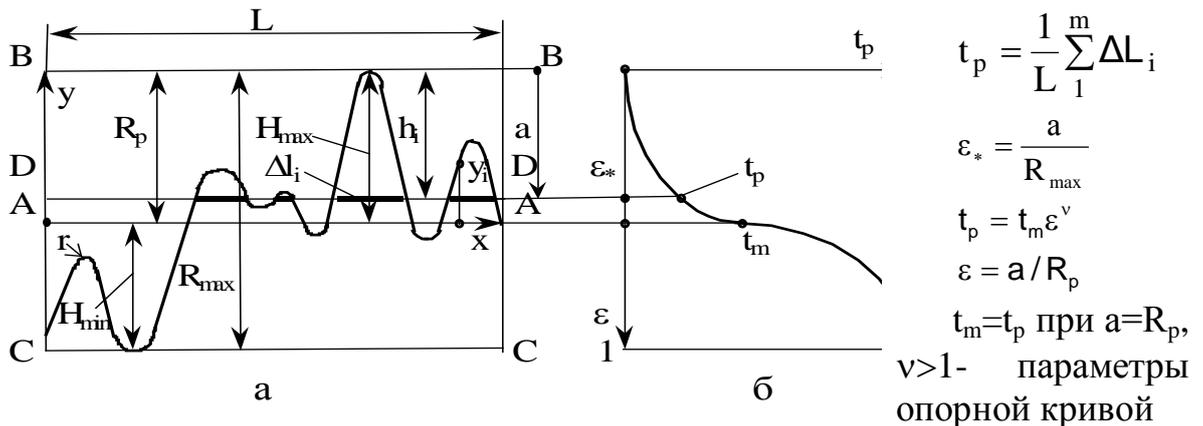
Характеристики шероховатостей иллюстрирует рис.2.3. Основные из них высотные: R_a , R_z и R_{max} и шаг микронеровностей.

Наиболее часто в технике применяют характеристику R_a - среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля шероховатостей от средней линии в пределах базовой длины L :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|. \quad (2.1)$$

В формуле (2.1.) L - базовая длина, в пределах которой находится достаточно представительное число микронеровностей с точки зрения статистики; Y_i - расстояние точки профиля от средней линии (см. рис. 2.3, а), n - число точек профиля, в которых измерено Y_i . Положение средней линии

AA находится из соображения о том, что она делит площадь профиля пополам ($\int_0^L y dx = 0$).



Р и с. 2.3. Характеристики шероховатостей
а) - характеристики шероховатостей; б) - опорная кривая.

Профиль заключен между линиями выступов ВВ и впадин СС, которые проводятся через вершины самых высоких выступов и самые низкие точки впадин.

Параметр R_z - характеризует среднее расстояние между пятью высшими вершинами выступов и пятью низшими точками впадин:

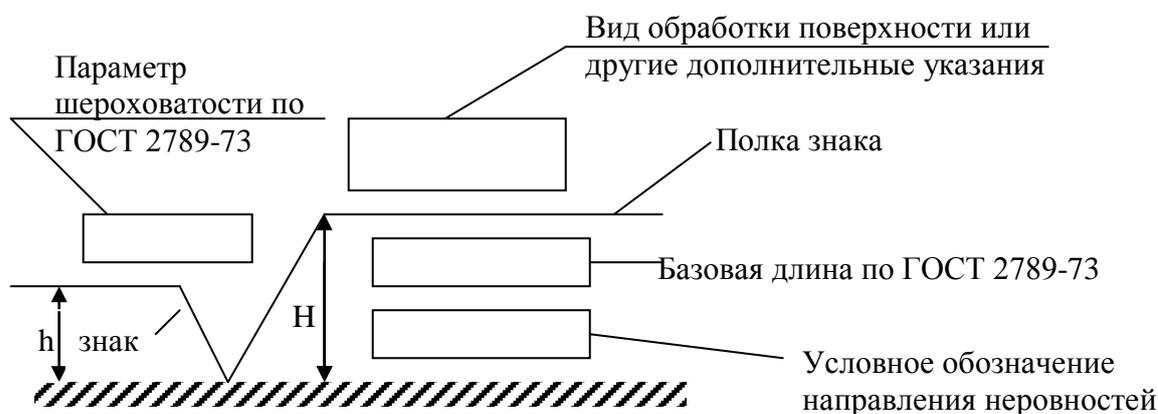
$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_1^5 |H_{imax}| + \sum_1^5 |H_{imin}| \right). \quad (2.2)$$

Расстояние между линиями выступов и впадин (R_{max}) равно толщине шероховатого слоя. Удаление линии выступов от средней линии обозначается R_p . Кроме перечисленных характеристик используются также средний шаг микронеровностей, средний угол наклона профиля, средний радиус закругления выступа.

Стандартом предусмотрено 14 классов шероховатости. В табл.2.1. для примера приведены данные шероховатости наиболее ответственных деталей ДВС автомобилей.

Используя рассмотренные здесь стандартные характеристики, решают задачу оценки фактической площади контакта шероховатых поверхностей (ФПК).

На конструкторских чертежах приняты следующие обозначения шероховатости поверхностей:



- √ - Метод образования поверхности не устанавливается (основной знак)
- ▽ - Шероховатость поверхности образована снятием припуска на обработку (точением, фрезерованием, сверлением, электрохимической обработкой и т.п.)
- ⊙ - Шероховатость поверхности образована без снятия припуска на обработку (литьем, ковкой, прокатом, волочением и т.п.)

Установлено 6 параметров шероховатости:

R_a – среднее арифметическое отклонение профиля

R_z - высота неровностей профиля по 10 точкам. Определяется суммой среднеарифметической абсолютных отклонений точек 5 наибольших минимумов и 5 наибольших максимумов

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |H_{i\max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i\min}| \right)$$

$R_{\max} = 1600 \dots 0,025$ мкм max. высота неровностей;

S_m – средний шаг неровностей;

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{m_i}, \quad n - \text{число шагов};$$

S – средний шаг в пределах базовой длины неровности;

t_p – относительная опорная длина профиля. (находится в пределах 90... 100%).

При необходимости устанавливаются требования к направлению неровности поверхности:

параллельное (=),

перпендикулярное (\perp),

перекрещивающиеся (\times),

произвольное (M),

кругообразное (C),

радиальное (R)

R_q – среднее квадратическое отклонение профиля (корень квадратный из суммы квадратов расстояний точек профиля от средней линии)

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y_i^2 dx} \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}}$$

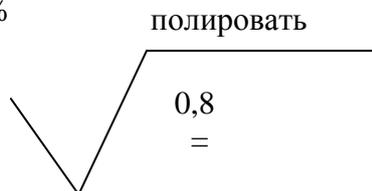
Пример обозначения

$R_a = 0,1 \text{ мк}$

$S_m = 0,063 \div 0,040 \text{ мм};$

$t_{50} = 80 \pm 10\%$

$l = 0,8 \text{ мм}$



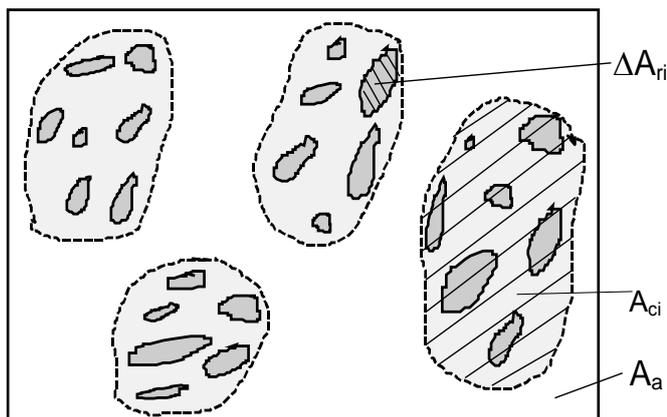
направление рисок – параллельное, полировать.

Микрогеометрия оценивается на малых участках реальной поверхности с длиной стороны квадрата 1-10 мкм.

$S/H > 1000$ макрогеометрические отклонения (конусность, овальность, вогнутость)

$S/H = 50 \div 1000$ волнистость поверхности;

$S/H < 50$ шероховатость поверхности (совокупность неровностей с относительно малыми шагами на базовой длине, образующих рельеф поверхности)



Р и с. 2.4. Структурные компоненты реального контакта шероховатых поверхностей: A_a - номинальная площадь контакта; A_{ci} - контурная площадка; ΔA_{ri} - фактическая площадь единичного пятна контакта.

На рис. 2.4 показана структурная схема площади контакта. Площадки фактического контакта ΔA_{ri} сгруппированы на площадях касания волн, совокупность которых составляет контурную площадь контакта ΔA_{ci} (КПК).

Характеристики шероховатости

Наименование детали	Клас с	R _a , мкм	r, мкм	R _{max} , мкм
Гильза цилиндра	9	0,04	100	1,2
Коленчатый вал	9	0,05	500	1,6
(шейки)	10÷1	0,02	270	0,48
Поршневое кольцо	1			

Общая площадь соприкасания тел (кажущаяся), в пределах которой заключены ФПК и КПК, называется номинальной площадью контакта A_a (НПК).

Суммарная площадь фактического контакта

$$A_r = \sum_{i=1}^n \Delta A_{ri}. \quad (2.3)$$

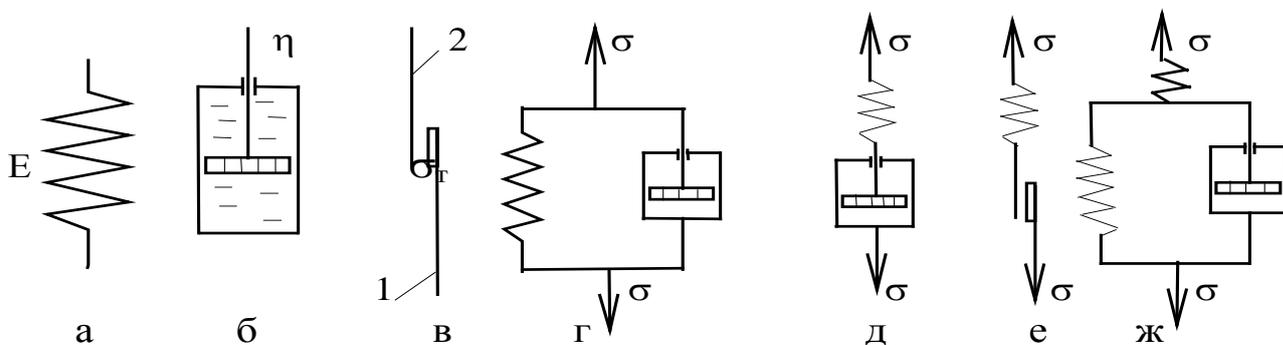
В целях расчета ФПК шероховатость поверхности обычно моделируют набором сферических сегментов, вершины которых разбросаны по высоте таким образом, чтобы сохранить закон распределения материала в шероховатом слое, который задается с помощью полученной из опыта опорной кривой.

При пластическом контакте среднее давление на пятна касания близко к твердости по Бринеллю, поэтому ФПК выражается в виде

$$A_r = N/HB. \quad (2.4)$$

Для приработанных поверхностей узлов трения характерен упругий контакт. Пластический контакт может частично проявиться при первых нагружениях, когда сжимаются наиболее высокие выступы. Последующие нагружения происходят уже в условиях, приближенных к упругому контакту. Пластический контакт имеет место также при обработке материалов резанием, ковкой, штамповкой, прессованием, накаткой и др.

Все материалы в большей или меньшей степени обладают вязкоупругостью и вязкопластичностью, т.е. упругая и пластическая деформации возникают не мгновенно после нагружения, а развиваются во времени. Скорость нарастания деформации увеличивается с повышением температуры. Такое поведение материалов, приводящее к изменению ФПК в зависимости от температуры и времени, описывается с помощью реологических моделей в рамках науки реологии. На рис. 2.5,а,б,в представлены простейшие модели, описывающие отдельные стороны поведения материалов.



Р и с. 2.5. Реологические модели

Первая модель (см. рис.2.5,а) характеризует идеальную упругость (тело Гука).

Для нее связь между напряжением (σ) и деформацией (ϵ) дается законом Гука:

$$\sigma = \epsilon E . \quad (2.5)$$

Вторая модель (см. рис.2.5,б) отражает вязкое течение (тело Ньютона). Для нее применима формула Ньютона:

$$\sigma = \eta \frac{dV}{dz} = \eta \frac{dx}{dt \cdot dz} = \eta \frac{d\epsilon}{dt} = \eta \dot{\epsilon} . \quad (2.6)$$

Здесь $\frac{dx}{dz} = d\epsilon$ - относительная деформация сдвига.

Третья модель (см. рис.2.5,в) характеризует переход к пластической деформации (тело Сен-Венана):

$$\sigma = \sigma_T \text{sign} \dot{\epsilon} , \quad (2.7)$$

где sign - обозначение ступенчато изменяющейся функции. Если $\sigma > \sigma_T$, то элементы 1, 2 являются одним целым ($\epsilon = 0$), если $\sigma < \sigma_T$ - элементы скользят относительно друг друга, тело неограниченно пластически деформируется ($\epsilon \rightarrow \infty$). Далее следуют комбинации из первых трех моделей (см. рис.2.5,г,д,е), отражающие в первом приближении свойства реальных тел. Первой (г) является модель Кельвина-Фойгта, учитывая, что общее напряжение здесь воспринимается телами Гука и Ньютона:

$$\sigma = \sigma_E + \sigma_\eta = E \cdot \epsilon + \eta \dot{\epsilon} . \quad (2.8)$$

Считая $\sigma = \text{const}$ и интегрируя, получаем закон развития деформации во времени:

$$\epsilon = \left(\frac{\sigma}{E} \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{E}{\eta} t \right) \right] . \quad (2.9)$$

Если в какой-то момент времени τ тело разгрузить ($\sigma=0$), то интегрируя уравнение (2.31), получим закон снижения деформации во времени:

$$\varepsilon = \varepsilon_T \exp\left[\left(-\frac{E}{\eta}\right)(t - \tau)\right]. \quad (2.10)$$

Отношение $\frac{E}{\eta} = t_0$ называют временем релаксации.

Для модели Максвелла (Д) при приложении нагрузки сначала мгновенно деформируется тело Гука, а затем вступает в действие тело Ньютона. Поскольку тела соединены последовательно, то напряжения у них одинаковы. Скорость деформации системы складывается из скоростей для обоих тел:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_E + \dot{\varepsilon}_\eta = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta}. \quad (2.11)$$

Если принять, что $\varepsilon = \text{const}$, интегрируя, получаем закон снижения напряжения во времени:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left[-\left(\frac{E}{\eta}\right)t\right], \quad (2.12)$$

где σ_0 - напряжение в начальный момент. Обе модели (см. рис.2.5,г,д) характеризуют поведение вязкоупругих тел.

Модель Прандтля -е характеризует поведение вязкопластичных тел.

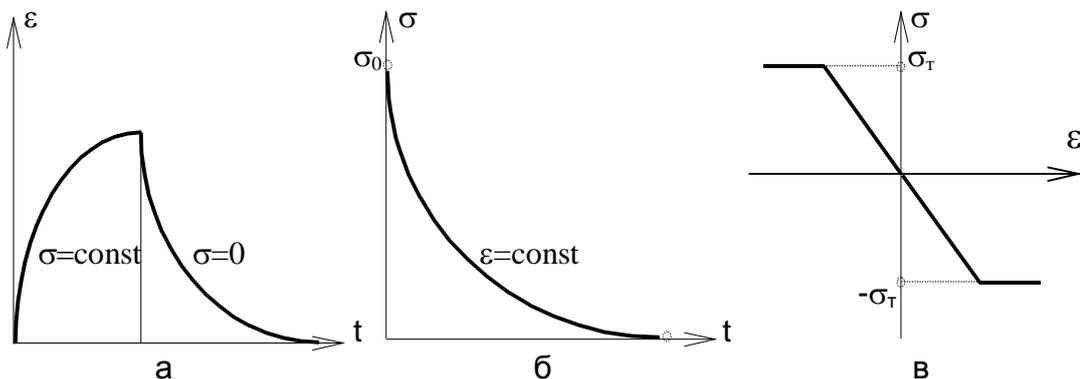
$$\text{Для нее} \begin{cases} \sigma = E\varepsilon & \text{при } -\varepsilon_T < \varepsilon < \varepsilon_T; \\ \sigma = -\sigma_T \text{sign} \dot{\varepsilon} & \text{при } -\varepsilon_T \geq \varepsilon \geq \varepsilon_T. \end{cases} \quad (2.13)$$

Здесь $\dot{\varepsilon}$ - упругая деформация при $\sigma = \sigma_T$, σ_T - предел текучести. Пока $\sigma < \sigma_T$, деформируется только тело Гука. Как только $\sigma \geq \sigma_T$, деформация неограниченно нарастает из-за проскальзывания тела Сен-Венана при постоянной деформации упругого элемента. На рис. 2.6. изображены реологические кривые для моделей Кельвина-Фойгта, Максвелла и Прандтля. Однако поведение реальных материалов в зоне контакта оказывается обычно сложнее, чем для рассмотренных моделей, поэтому приходится создавать более сложные композиции. В качестве примера на рис. 2.5,ж приведена модель, использованная в работах А.Ю. Ишлинского и И.В. Крагельского для объяснения зависимости силы трения от скорости скольжения.

Влияние температуры и времени на ФПК наиболее заметно проявляется при пластическом контакте. Рост ФПК при повышении температуры в основном обусловлен снижением твердости, происходящим по экспоненциальному закону. Временная зависимость ФПК при постоянной нагрузке для металлов удовлетворительно описывается формулой

$$\Delta A_{\text{рт}} = N(t_2^m - t_1^m) / \text{HB} \cdot t_{\text{HB}}^m, \quad (2.14)$$

где ΔA_{rt} - изменение ФПК за промежуток времени t_2-t_1 , $t_{НВ}$ - время выдержки под нагрузкой шарового наконечника при определении твердости по Бринеллю, m - реологическая постоянная материала.



Р и с. 2.6. Реологические кривые

Вкратце рассмотрим экспериментальные методы измерения ФПК. Наиболее точные результаты дают 3 метода: метод угольных пленок, метод оценки переноса атомов материала одной поверхности на другую и метод измерения площадок сжатия выступов при контакте шероховатого тела с гладким.

Первый метод наиболее прост и доступен. На поверхность одной из деталей пары, покрытой тончайшим слоем смазки, напыляется в низком вакууме тонкая (толщиной до 1 мкм) пленка угля. Затем на напыленную поверхность накладывают вторую деталь пары и сжимают их приложением нормальной нагрузки. В местах контакта пленка разрушается, и светлые пятна касания отчетливо видны на черном фоне. Их площадь легко измерить планиметрированием. Второй метод заключается в обследовании побывавшей в контакте поверхности на растровом электронном микроскопе с рентгеновским микроанализатором, который настраивается на материал контртела. Анализатор регистрирует пятна контакта, как совокупность перенесенных при взаимодействии атомов контр-тела. Третий метод основан на измерении площадок смятия выступов металлических шероховатых тел после их контактирования с плоской твердой гладкой поверхностью. Площадки видны, как зеркальные пятна на сером фоне. Измерения проводятся в автоматическом режиме с использованием телевизионных планиметров. Метод применим только в условиях пластического контакта.

Для обработки результатов замеров шероховатости используют комплексы с программируемыми ПК. Эти комплексы позволяют:

- получить любые необходимые наборы параметров микрогеометрии;
- адаптировать характеристики системы к имеющемуся к техническим средствам;
- модифицировать систему в соответствии со спецификой исследований или испытаний;
- ассимилировать последние достижения техники и методов измерения

параметров и описания микрогеометрии.

Достоинства комплексов с программируемыми ПК способствуют их широкому распространению в практике исследований и испытаний контактных поверхностей шероховатых тел.

Вопросы по теме

1. Характеристики геометрии шероховатых поверхностей
2. Схема и работа профилографа
3. Высотные показатели шероховатостей R_a , R_z и R_{max} .
4. Реальный контакт шероховатых поверхностей
5. Методы измерений фактической площади контакта.

Вопросы по самостоятельной работе

1. Как определяется линейный износ резинового манжетного уплотнения?

Литература

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М., Машиностроение, 1989, с. 328
2. Лебедев О.В., Кадыров С.М. Цикл лекций по трибологии. Т., Укитувчи, 1995, с. 128
3. Лебедев О.В., Кадыров С.М. Основы трибологии. Т., изд. ТАДИ, 2000, 176 с.
4. Лебедев О.В., Турсунова Г.Х. Методические указания по выполнению курсовой работы. Т., изд. ТАДИ, 2008, с. 34
5. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машины. Справочник. М., Машиностроение, 1983, с. 320
6. Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерения и анализ шероховатости и некруглости поверхности. М., Машиностроение, 1978, с. 232

3. Материалы трущихся деталей.

Специалисты утверждают, что $\frac{3}{4}$ затрат, связанных с производством автомобиля, «лежат на острие конструктора».

Но в большинстве случаев отказы автомобилей имеют производственно-технологический характер. Например, фирма «Фольксваген» отозвала для ремонта почти 1 млн. автомобилей «Поло» и «Лупо», сошедших с конвейера в 1999 году. Причина – претензии к качеству материала, из которого изготовлены шланги привода усилителя тормозов. «Хонда Мотор» сделала то же самое в отношении 2,57 млн. своих автомобилей, произведенных в Японии, США и Канаде, на общую сумму 182 млн. долларов, из-за повышенного износа контактов системы зажигания, что могло привести к её отказу в пути! По данным одного из специализированных английских изданий 13% легковых автомобилей выпусков 1997-1999 гг. имели неисправности в эксплуатации из-за применяемых материалов, а модели «Альфа Ромео» и «Ленд Ровер» - более 20%. Британские же эксперты считают: 25% неисправностей на модель – тот предел, с которого её нужно считать ненадежной.

Выбор конструкционных материалов деталей узлов трения представляют собой базовую проблему при стремлении к высоким эксплуатационным характеристикам и рассматриваются трибоматериаловедением.

Основными задачами трибоматериаловедения являются отбор известных и создание новых материалов, обладающих оптимальными для данного узла трения характеристиками, обеспечивающими необходимый ресурс. При этом, помимо достижения необходимых эксплуатационных свойств, требуется учитывать экономические соображения исходя из рыночных условий. Поэтому трибоматериаловедение обычно решает компромиссные задачи, когда требуется достижение целесообразного соотношения между уровнем эксплуатационных характеристик и себестоимостью.

В связи с этим важно, чтобы материалы узлов трения создавались из доступных недефицитных компонентов с использованием технологий, не требующих нестандартного оборудования, высокого вакуума, криогенных температур и других дорогостоящих мероприятий.

Все материалы узлов трения можно разделить на две группы: антифрикционные и фрикционные. Первые применяются при создании подвижных соединений с низким трением и высокой износостойкостью: подшипников качения и скольжения, шарнирных соединений, направляющих для ползунов, эксцентриковых и кулачковых механизмов и т.д. Вторые применяются в тормозах, фрикционных передачах и муфтах. Они должны обладать не только высоким и стабильным коэффициентом трения, но и высокой износостойкостью.

При выборе материалов узлов трения должна учитываться их совместимость, в особенности использование схватывания и последующего

задира, что связано с химическим средством, близостью строения и значений параметров кристаллических решеток. В более общей форме под совместимостью понимают способность материалов обеспечивать оптимальные параметры узла трения при длительной эксплуатации, быстро приспосабливаться к резким изменениям нагрузки, скорости и температуры при неблагоприятных условиях смазки.

Процесс приработки должен заканчиваться образованием на поверхностях трения тонких слоев вторичных структур, предохраняющих материал от схватывания и задиров, а также равновесной шероховатости, необходимой для обеспечения стабильного значения коэффициента трения.

В этой области наукой еще не вполне раскрыты механизмы самоорганизации в зоне контакта и пути воздействия на способность пар трения к самоорганизации, когда система сама формирует оптимальную микрогеометрию поверхностей, защитные пленки, перестраивает структуру поверхностных слоев металла, меняет твердость в целях сохранения нормального функционирования. В настоящее время применяют прямые и косвенные методы оценки совместимости материалов узлов трения. В обоих случаях сначала проверяется, не обладают ли материалы химическим средством - совместимостью кристаллических решеток. При прямых методах проводятся испытания материала на машинах трения с целью определения критических значений параметров режима нагружения, приводящих к задире, т.е. нахождения границ применимости исследуемой пары. Косвенные методы основаны на определении параметров микрогеометрии, микроструктуры поверхностных слоев, физико-механических свойств, их изменения в процессе трения в целях прогнозирования совместимости. Окончательный же ответ на вопрос о совместимости материалов могут дать лишь ресурсные полные испытания.

3.1. Металлические антифрикционные материалы

Антифрикционные материалы используются преимущественно в ответственных узлах, подшипниках, шарнирах, направляющих скольжения и качения, распределительных валах, клапанных и кулачковых механизмах и т.д.

Цапфы подшипников скольжения обычно изготавливают из сталей и чугунов.

Из числа легированных сталей наиболее часто применяют: марганцовистые (35Г2, 40Г2, 45Г2, 50Г2 и др.), хромомолибденовые (30ХМ, 3ХМА, 35ХМ, 38ХМ), хромоникелевые (40ХН, 45ХН, 30ХНЗА), хромоникелевые с бромом (30ХНР, 40ХНР) и хромомарганцовистоникелевые с бромом - 40 ХГНР. Детали подвергают либо объемной закалке с отпуском, либо поверхностной закалке токами высокой частоты (ТВЧ).

Для подшипников скольжения (вкладышей, втулок шарниров и др.) используются различные антифрикционные сплавы. К ним относятся сплавы на медной, цинковой, алюминиевой и оловянно-свинцовой основах. Последние получили название баббитов. Изредка применяют антифрикционные чугуны с графитными включениями.

Баббиты и чугуны применялись на начальном этапе развития техники и имеют лишь историческое значение. По мере роста мощности двигателей, ужесточения режима эксплуатации, снижения металлоемкости произошел переход к более твердым подшипниковым материалам на медной, цинковой и алюминиевой основах, хорошо совместимых со сталями.

Медные антифрикционные материалы разделяются на бронзы и латуни. Бронзы - это сплавы меди с оловом и другими элементами. У них цинк и никель не являются главными легирующими компонентами. Наиболее распространены оловянистые бронзы. Не основными легирующими элементами являются свинец, никель, фосфор, цинк, железо и др.

Меньшее распространение, чем бронзы, получили латуни. Наиболее часто в качестве антифрикционных материалов используют кремнистые и марганцовистые латуни, а также алюминиево-железистые.

В качестве подшипниковых материалов успешно применяются цинковые сплавы с легирующими элементами в виде меди, алюминия, магния. Низкая температура плавления (400°C) и повышенная размягчаемость обеспечивают хорошую прирабатываемость. Из них делают биметаллические вкладыши подшипников скольжения. В стальной стакан заливается цинковый сплав, который ровным слоем покрывает внутреннюю поверхность. Другим способом изготовления вкладышей является штамповка их из биметаллической полосы, состоящей из стали и цинкового сплава и получаемой методом горячей прокатки. Такие вкладыши используются в некоторых видах тракторных двигателей.

В современном автомобиле- и тракторостроении широкое распространение получили антифрикционные сплавы на основе алюминия. Алюминиевые сплавы обладают сравнительно высокой прочностью, коррозионной стойкостью, дешевы и недефицитны, имеют низкую плотность и высокую теплопроводность. В качестве легирующих элементов используются олово, медь, никель, кадмий, кремний, железо, марганец, титан и другие элементы. В автомобилестроении наиболее распространены алюминиево-оловянистые сплавы с содержанием олова до 22,5%. При содержании олова более 9 % возможно применение вкладыша без покрытия мягким металлом. В других случаях на рабочую поверхность наносится защитный слой олова. Наибольшее распространение получил сплав А020-1 (1 %-Са, 20% - Sn, 0,02 - 0,1 Ti, остальное - Al). Биметаллические вкладыши изготавливаются путем совместной прокатки с последующей штамповкой. При нарушении режима гидродинамической смазки и возникновении металлического контакта, как на поверхности вкладыша, так и цапфы образуется защитная пленка мягкой фазы - олова, внутри которой и локализуются сдвиговые деформации.

Методами оптической металлографии и магнитных измерений исследованы структурные и магнитные характеристики мартенситного превращения в сплавах системы Fe-Ni-Co-Ti с добавками меди. Установлено, что легированием медью этих сплавов позволяет уменьшить

ширину температурного гистерезиса мартенситного превращения до $\Delta T \approx 60^\circ\text{C}$, при этом температура Кюри сохраняется на уровне $\approx 300^\circ\text{C}$.

По уровню магнитных характеристик сплавы Fe-Ni-Co-Ti-Cu могут оказаться перспективными для материалов, в которых реализуется возможность управления механическими свойствами под влиянием магнитного поля.

3.2. Антифрикционные материалы, получаемые из порошков и пласт.масс

Одним из направлений получения антифрикционных материалов является создание порошковых антифрикционных композитов. Изделия (втулки, вкладыши подшипников) получают методом порошковой металлургии. Сначала составляется смесь из порошков необходимых веществ, которая после тщательного перемешивания прессуется в виде изделия и спекается. Если это необходимо, то осуществляется механическая отделочная обработка изделия и насыщение пор смазкой. Наиболее распространены материалы на основе меди и железа.

Материалы на основе меди получили широкое применение из-за хороших антифрикционных свойств и высокой электропроводности, например, в скользящих электроконтактах в щётко-коллекторных узлах электродвигателей и генераторов и т.д. Типичным представителем этой группы являются медно-графитовые компоненты с содержанием графита до 75 %. Для улучшения свойств электрощеточных материалов в них добавляют олово, цинк, свинец. Графит обеспечивает смазывание контакта и электропроводность.

В качестве подшипникового материала также используются пористые оловянные бронзы. Они применяются в подшипниках, работающих в легком режиме при небольших скоростях скольжения (менее 1,5 м/с) и номинальных давлениях (0,5 - 1 МПа). Благодаря смазке, содержащейся в порах, они могут работать без наполнения маслом до 5000 ч при температуре от -60°C до 120°C с коэффициентом трения 0,01 - 0,04. Эти подшипники используются в маломощных электромоторах и генераторах, пусковых установках ДВС. В табл. 3.1 приведены сведения о некоторых оловянистых бронзах.

Таблица 3.1.

Свойства оловянистых бронз

Марка	Массовая доля Sn, %	Плотность, кг/м ³	Пористость, %	Предел прочности σ_B , МПа	Твердость НВ, МПа
Бр010	10	6 - 7	20 - 30	20 - 35	60 - 75
Ст100 США)	9,5 - 10,5	6,4 - 7,2	---	40 - 50	100 - 120
SM500 (ФРГ)	10	5,6 - 11	---	---	---

В подшипниках мотоциклов, тракторов, насосов и др. используются бронзографитные материалы. Они выдерживают большие нагрузки и скорости скольжения, чем бронзы.

В двигателях грузовых автомобилей, судовых и железнодорожных дизелях обычно используются свинцовистые бронзы. Стальная лента сначала

покрывается электролитическим слоем меди, на которую наносится порошок свинцовистой бронзы. Порошок припекается к ленте в конвейерной печи. После припекания производится обжатие ленты методом прокатки. Из ленты штампуют заготовки вкладышей, которые затем механически обрабатываются. На заключительной стадии электролитическим способом наносится слой мягкого металла (свинца, олова, меди, индия).

Аналогичным способом получают и используют спеченные латуни, сложнолегированные бронзы. Помимо графита в качестве самосмазывающей добавки используются дихалькогениды металлов: дисульфиды, диселениды, дителлуриды и др.

В последнее время широко используются металлофторопластовые материалы. Они обладают широким диапазоном эксплуатационных свойств, способны работать без смазки в агрессивных средах, в вакууме, при температуре от -200°C до 300°C . Подшипниковые вкладыши состоят из стальной основы, тонкого припеченного слоя высокооловянистой бронзы (до 0,3 мм), поры которого заполнены смесью фторопласта с дисульфидом молибдена.

Помимо сплавов на медной основе все больше распространяются антифрикционные алюминиевые сплавы. Технология изготовления вкладышей такая же, как при применении медных сплавов. Поры пропитываются маслом. Используются твердосмазочные добавки. В США в подшипниках автомобильных двигателей применяются вкладыши из стальной ленты с припеченным порошком свинцово-оловянного сплава. Технология та же, что при изготовлении вкладышей из свинцовой бронзы.

Наиболее распространены в общем машиностроении (сельхозмашины, дорожно-строительные механизмы и т.д.) материалы на основе железа. В шихту, также, как и у медных сплавов, вводится графит, сернистый цинк, дисульфид молибдена, нитрид бора. Поры спрессованного материала заполняются маслом. Чаще всего применяются железографитовые втулки. С ростом содержания графита улучшаются антифрикционные свойства, однако падает прочность. Содержание графита обычно не превышает 10% от общей массы. В качестве легирующих элементов к железу добавляют медь, серу, фосфор. Медь повышает прочность и улучшает спекаемость. Её содержание колеблется от 0,5 до 20%.

Применение железографитовых подшипников позволяет экономить большое количество сплавов цветных металлов, бронзы, баббита. В ряде случаев железографитовые подшипники скольжения могут успешно заменить шариковые и роликовые подшипники качения. Наличие графита и запас жидкой смазки в порах придают металлокерамическим подшипникам свойства самосмазывающихся, что уменьшает опасность выхода из строя узлов трения из-за недостаточной смазки.

В настоящее время решена задача изготовления металлокерамических поршневых колец для двигателей внутреннего сгорания. Такие поршневые кольца имеют более высокую износостойкость по сравнению с обычными чугунными. Они работают до выхода из строя на 30-45 тыс. км пробега

автомашин больше, чем чугунные, и на 30% меньше изнашивают цилиндры двигателя.

Расширяется также применение пористых спеченных подшипников, пропитанных фторопластом. Такие подшипники весьма перспективны для несмазываемых опор скольжения благодаря высоким антифрикционным свойствам фторопласта. Коэффициент трения подшипников, пропитанных фторопластом, без смазки составляет примерно 0,05. Они надежно работают при температурах до 280°C в кислых и щелочных средах.

Разработаны антифрикционные спеченные материалы для подшипников газовых и паровых турбин, работающих при высоких температурах. Для получения этих деталей используют порошки хромоникелевых сталей типа Х18Н15, ХЗН18 с добавками в шихту дисульфида молибдена. Спеченные материалы имеют плотность, превышающую 90%. Более низкая стоимость пористых спеченных подшипниковых материалов по сравнению с бронзой и баббитом стимулирует дальнейшее развитие этого направления разработки триботехнических материалов и технологий.

3.3. Фрикционные материалы

В отличие от антифрикционных фрикционные материалы должны обладать высоким и стабильным коэффициентом трения, достаточной износостойкостью, прочностью, устойчивостью к температурным скачкам, воздействию абразива и агрессивных сред. В частности, материалы тормозов и фрикционных муфт должны обеспечивать плавное срабатывание системы без автофрикционных колебаний, проявляющихся в форме скрипа при торможении, или пробуксовки и обеспечивать высокий срок службы. При торможении вся кинетическая энергия транспортного средства в тормозах рассеивается в тепло. Поэтому в момент торможения температура трущихся поверхностей, например в тормозе самолетов, достигает 1200°C, а в объеме тормозной накладки до 600°C. В тормозах автомобилей эти температуры соответственно могут достигать 400°C и 200°C.

Для изготовления ряда элементов наиболее нагруженных фрикционных устройств - тормозов и муфт сцепления - применяются материалы, получаемые методом порошковой металлургии. Наибольшее распространение получили материалы на основе железа и меди. Состав материалов на основе железа приведен в табл. 3.2.

Таблица 3.2.

Состав фрикционных порошковых материалов на железной основе

Марка материала	Массовая доля, %						Другие добавки, %
	Fe	Cu	Ni	Графит	SiO ₂	Асбест	
ФМК - 8	45	-	25	7	-	-	10Cr; 6W; 7Cu ₂ S
ФМК - 11	64	15	-	9	3	3	6BaSO ₄
МКВ - 50А	64	10	-	8	-	3	5FeSO ₄ ; 5SiC; 5B ₄ C
СМК - 80	48	23	-	-	-	-	6,5Mn; 6,5BN; 10B ₄ C; 3,5SiC; 2,5MoS ₂

Первые три материала разработаны для тяжелонагруженных тормозов и муфт самолетов и военной техники. Материал СМК-80 применяется в тормозах и муфтах сцепления большегрузных автомобилей - карьерных самосвалов грузоподъемностью более 65 т.

Спеченные материалы на основе меди также широко используются в тяжелых транспортных средствах. В табл. 3.3 приведены данные о составе фрикционных материалов на медной основе.

Таблица 3.3.

Состав фрикционных порошковых материалов на медной основе

Массовая доля, %							Другие добавки, %
Cu	Sn	Pb	Fe	Графит	Асбест	SiO ₂	
68÷76	8÷10	7÷9	3÷5	6÷8	-	-	-
60÷75	6÷10	20	5	1÷8	-	-	Ti, V, Si, 6MoS ₂ , 2÷10As
18	2	3	3	3	30	-	40 стеклянного волокна, 10 сульфида Al
68÷86	5÷10	5÷15	2	4÷8	3	3	до 2Ni
75	8	5	4	1÷20	-	-	0,75Si, 6Zn

Наибольшее распространение получил материал МК5 (первая строка таблицы). В автомобильном и тракторостроении из этих материалов изготавливают тормозные диски, колодки и накладки для муфт сцепления.

Порошковая технология позволяет получать фрикционные материалы с заданными свойствами. Для автомобилей малой и средней грузоподъемности и для сельскохозяйственных и промышленных тракторов малой и средней мощности обычно используются фрикционные материалы на полимерной основе. Они применяются также в сельскохозяйственном и дорожно-строительном машиностроении, в буровой технике и т.д.

Как правило, в состав материалов входит 3 компонента:

теплостойкий армирующий материал с прочными волокнами, например асбест (15÷16%);

теплостойкие с высоким и стабильным коэффициентом трения порошкообразные наполнители неорганического происхождения (20÷60%);

полимерное связующее: натуральные и синтетические каучуки, синтетические смолы (15÷30%) с вулканизационными агентами или отвердителями, ускорителями и активаторами вулканизации или отверждения.

Наиболее распространенным армирующим элементом является уникальный природный минерал, добываемый открытым методом - асбест. Элементарные волокна асбеста имеют вид трубок с наружным диаметром около 32 нм и внутренним - 2,6 нм, т.е. в поперечном направлении волокно имеет размеры, характерные для коллоидно-дисперсных материалов. Элементарные волокна упакованы в пряди диаметром от нескольких десятков до сотен микрометров. В прядях волокна удерживаются силами межмолекулярного притяжения. Средняя длина волокна составляет 1÷3 мм. По своей химической природе асбест является водным силикатом магния.

Волокна асбеста обладают высокой прочностью на растяжение (до 3 ГПа), много превышающей прочность стали. Полости волокон частично или полностью заполнены водой, которая образует на внутренней поверхности практически мономолекулярный слой, поэтому она проявляет свойства иные, чем обычная влага, удаляясь лишь при температуре выше 425°C. Вид кристаллической решетки этого материала достоверно не установлен. Асбест обладает высоким коэффициентом трения (до 0,8), который слабо меняется в зависимости от температуры. То же можно сказать о прочности волокон, которая при нагревании до 400°C снижается всего на 20%. Лишь при 800°C наблюдается разрушение волокнистой структуры. Таким образом, асбест как будто специально создан как основа для фрикционного материала. Однако у асбеста имеется и существенный недостаток. Он считается экологически опасным материалом. Тончайшие моноволокна, попадая в воздух в виде пыли, образуют устойчивую взвесь, которая весьма медленно оседает. Попадая в легкие людей и животных, волокна поражают органы дыхания, вызывая заболевание "асбестоз". Пораженные участки легких могут стать центрами образования раковых клеток. Во многих странах уже запрещено использование асбеста в строительстве, электротехнике и других отраслях. Такие же тенденции наблюдаются и в производстве тормозных материалов, но найти эффективную замену асбесту пока не удалось. Имеются попытки заменить асбест волокнами из стекла, базальта, шлака, бора, углерода, но эти материалы еще не дали такого же эффекта, как асбест. В частности, нет такого материала, который так же, как асбест, очищал бы поверхность металлического контртела и при этом поглощал и связывал продукты изнашивания, не говоря о других качествах. Поэтому асбест пока сохраняет заслуженное лидерство среди компонентов фрикционных материалов.

Наполнителями асбестовых материалов служат железный сурик, баритовый концентрат, окислы хрома и других металлов. Добавляются также порошкообразный кокс, графит, технический углерод. Для повышения теплопроводности вводятся порошки и стружка из меди, латуни, цинка, алюминия, железа и т.д.

Связующими являются натуральные и искусственные каучуки и смолы, а также их комбинации. Используются бутадиеновые, бутадиентиррильные, бутадиенметилвинилпиримидиновые, стирольные и другие синтетические каучуки. В качестве смол применяются фенолформальдегидные, анилинфенолформальдегидные, кремнеорганические, эпоксидные компаунды и др. Одновременно вводятся вулканизаторы и отвердители.

Изделия на каучуковой основе обладают достаточно высоким коэффициентом трения и износостойкостью. Однако при повышении температуры выше 200 ÷ 250°C коэффициент трения и износостойкость заметно снижаются.

Изделия на смоляной основе имеют большую теплостойкость, но обладают нестабильным коэффициентом трения, хрупкостью. Поэтому наилучший результат достигается при совместном использовании смол и

каучуков. Неудачное сочетание связующих из-за нестабильности коэффициента трения приводит к возникновению автофрикционных колебаний (скрип и визг тормозов).

Фрикционные муфты и тормоза являются весьма ответственными узлами, поскольку определяют безопасность эксплуатации транспортных средств, поэтому при их разработке производится весьма точный и детальный расчет. Изготавливаются опытные образцы, которые проходят сначала лабораторные, затем стендовые и натурные испытания. Особо тщательно обрабатываются новые тормозные материалы, подвергающиеся длительным испытаниям по специальным методикам.

По способу изготовления фрикционные материалы на полимерной основе делятся на 4 группы: формованные (прессованные) материалы (колодки, накладки, секторы, пластины, вкладыши); вальцованные (ленты и накладки); тканые (ленты, накладки); картонно-латексные (накладки). Номенклатура и характеристики фрикционных и антифрикционных материалов очень обширна и содержится в справочной литературе.

3.4. Полимерные материалы

Обзор полимерных материалов (пластмасс) представлен по данным Ю.К. Машкова. Эти материалы широко применяются в узлах трения современных машин и механизмов. Применение пластмасс позволяет увеличить надежность и ресурс машин, улучшить их эксплуатационные, технико-экономические характеристики и технологичность, отказаться от дефицитных сплавов цветных металлов и снизить стоимость машин.

Пластмассы подразделяются на термопластичные и термореактивные. К термопластичным относятся пластмассы с линейной или разветвленной структурой полимеров, свойства которых обратимо изменяются при многократном нагревании и охлаждении. К термореактивным пластмассам относятся полимеры, в которых при термическом воздействии возникают реакции химического связывания цепных молекул друг с другом с образованием сетчатого строения. Такие пластмассы не могут переходить в пластичное состояние при повышении температуры без нарушения пространственных связей в структуре полимера.

Полимеры (термопластичные и термореактивные) могут использоваться в качестве антифрикционных материалов как в чистом виде, так и в виде композиционных материалов с различными наполнителями. Из полимерных материалов изготавливают зубчатые колеса, шкивы, трущиеся элементы подшипников скольжения, кулачковых механизмов, направляющих, уплотнений, сепараторы шарикоподшипников, втулки шарниров и т.д.

Антифрикционные материалы на основе термопластов отличает высокая технологичность, низкая себестоимость, хорошие демпфирующие свойства. Детали из термопластов изготавливают высокопроизводительными методами - литьем под давлением и экструзией; крупногабаритные детали - центробежным литьем, ротационным формованием, анионной

полимеризацией мономера непосредственно в форме, нанесением антифрикционных покрытий из расплавов, порошков, дисперсий.

Термореактивные полимеры обрабатываются преимущественно методами компрессионного и литьевого прессования, они более прочны и термостойки. Порошкообразные термореактивные композиции наносят на трущиеся поверхности деталей в виде тонких покрытий.

В качестве антифрикционных термопластичных материалов наиболее широко используют полиамиды (капрон, П68, П6, П12 и др.), обладающие низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью и работающие при температуре от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$. К недостаткам полиамидов следует отнести их относительно высокое водо- и маслопоглощение. Деталям из полиамидов свойственна хорошая сопротивляемость воздействию циклических нагрузок, возможность работы без смазки в паре с закаленной сталью. Коэффициент трения полиамидов по стали без смазки $0,1 \div 0,2$, со смазкой маслом - в пределах $0,05 \div 0,10$.

Для повышения механических свойств полиамиды армируют волокнистыми и другими материалами, а для улучшения антифрикционных свойств в них вводят различные твердосмазочные графитоподобные компоненты.

В качестве последних применяют графит, дисульфид молибдена, тальк, термоантрацит, а в качестве армирующего наполнителя - мелконарубленное стекловолокно или измельченное углеродное волокно.

Температурный коэффициент линейного расширения и водопоглощение наполненных полиамидов в $1,5 \div 4,0$ раза меньше, коэффициент трения без смазки в $1,2 \div 2,0$ раза больше, а интенсивность изнашивания в $2 \div 5$ раз ниже, чем у ненаполненных полиамидов. Полиамиды применяют также в качестве тонкослойных покрытий металлических деталей.

В приборо- и машиностроении для изготовления деталей узлов трения широко применяют фторопласты и композиционные материалы на основе фторопластов. Фторопласты отличаются высокой химической стойкостью, высокой температуростойкостью (до 300°C), а также сохраняют работоспособность, не охрупчиваясь при охлаждении до -250°C .

На фторопласты практически не действуют кислоты, окислители, щелочи, растворители. При температуре выше 350°C фторопласты реагируют с некоторыми металлами и окислами. Коэффициент трения фторопластов, особенно фторопласта-4 ($0,03 \div 0,05$) находится на уровне значений коэффициента трения металлических пар в гидродинамическом режиме скольжения.

Применение фторопластов в чистом виде без наполнителей весьма ограничено вследствие низкой прочности и износостойкости. В машиностроении используются в основном композиционные материалы. Введение различных наполнителей (кокс, графит, дисульфид молибдена, металлические порошки, стекловолокно, углеродное волокно) в количестве

15÷45% по массе позволяет значительно повысить прочность и износостойкость (в 10÷100 раз и более). Использование фторопластов в виде лаков, паст, суспензий для изготовления антифрикционных наполнителей для различных композиционных материалов на основе термопластических и термореактивных полимеров значительно снижает коэффициент трения и интенсивность изнашивания многих узлов трения.

Ароматические полиамиды применяются для изготовления деталей узлов трения как в чистом виде, так и в виде композиционных материалов, наполненных фторопластом, графитом, дисульфидом молибдена и другими твердыми смазочными материалами. Детали из ароматических полиамидов отличаются высокой прочностью и теплостойкостью, их изготавливают методами компрессионного и литьевого прессования. Выпускаемый промышленностью ароматический полиамид фенилон стоек против многих химических веществ, масел, бензина. Детали из фенилона можно эксплуатировать при температурах от -50 до +200°C. Наполнение фенилона твердыми смазочными материалами значительно улучшает его триботехнические свойства.

Фенилон используют для изготовления подшипников скольжения, подпятников, уплотнений, зубчатых колес, сепараторов шарикоподшипников, деталей клапанов, кулачков и т.д.

Поликарбонат применяют в машино- и приборостроении, в радио- и электротехнической промышленности, для изготовления деталей точных станков, приборов, вычислительных машин и т.д. Поликарбонат стоек к атмосферным воздействиям, воды, водных растворов минеральных кислот и солей, окислителей, масел, в то же время он растворяется в ряде углеводородов (ацетон, толуол и др.), набухает в бензине.

Поликарбонат пригоден для работы в условиях низких и сверхнизких температур, в среде газообразного и жидкого азота, водорода и гелия при температуре до -253°C. Он обладает высокой ударной прочностью и стабильностью размеров деталей, малой ползучестью, однако плохо сопротивляется циклическим воздействиям нагрузки и имеет низкую усталостную прочность.

Промышленность выпускает поликарбонат - дифлон, наполненный 25% по массе стекловолокном (дифлон СТН) и наполненный фторопластом (дифлон ДАК 8).

Освоено производство антифрикционного поликарбоната, представляющего собой дифлон, модифицированный фторопластом - 4. У этого материала сохраняются высокие физико-механические и диэлектрические свойства поликарбоната и одновременно в 1,5÷2 раза улучшаются антифрикционные свойства. Поликарбонат перерабатывают литьем под давлением и экструзией и применяют в несмазываемых узлах трения, например в криогенной и микрокриогенной технике.

Расширяется применение полиолефинов (полиэтилен высокого давления, полипропилен) в качестве антифрикционных материалов как в чистом виде, так и в композициях с наполнителями. Полиолефины стойки к

действию большинства кислот, щелочей, не растворяются в органических растворителях при 20°C. Однако сильные окислители (азотная кислота и др.), хлор, фтор разрушают их, и при повышенных температурах они растворяются во многих органических растворителях.

На основе полиолефинов создают композиционные материалы, вводя различные наполнители (сажу, каучук, стекловолокно, древесные опилки и т.д.), что позволяет получать материалы, обладающие высокой износостойкостью и коэффициентом трения $0,1 \div 0,15$. К недостаткам свойств полиолефинов следует отнести низкую теплоемкость, так как детали узлов трения могут длительно эксплуатироваться при температуре не выше 60°C (кратковременно до 80°C). Это снижает возможность применения полиолефинов в машиностроении.

Полиарилаты - термопластичные полимеры, перерабатываются литьем под давлением или литьем прессованием. Детали узлов трения из полиарилата могут работать длительно при температуре 160 – 180°C, кратковременно - при температуре 230°C. Наряду с высокой теплостойкостью полиарилат обладает высокой сопротивляемостью ионизирующим излучениям, хорошими диэлектрическими свойствами, достаточной химической стойкостью, морозостойкостью (могут работать при температуре до -100°C). Для улучшения антифрикционных свойств полиарилаты наполняют твердыми смазочными материалами. Упомянутые свойства полиарилатов показывают, что это весьма перспективный материал для деталей узлов трения, особенно для несмазываемых.

Другим перспективным материалом являются полиамиды. Это теплостойкие терморезистивные полимеры, применяющиеся в качестве связующего при изготовлении композиционных антифрикционных материалов. На основе полиимидов выпускают композиты, наполненные дисульфидом молибдена и графитом. В последние годы разработаны материалы, наполненные углеродным волокном. Эти материалы обладают высокой радиационной и химической стойкостью, прекрасными триботехническими свойствами и могут длительно эксплуатироваться при температуре 220÷260°C. Изделия из таких материалов получают в основном прессованием с последующим спеканием.

Высокой химической стойкостью и малым водопоглощением обладает полимер пентапласт. Его применяют для изготовления деталей узлов трения повышенной точности (шестерен, уплотнительных манжет, уплотнительных колец и т.д.). Детали из пентапласта можно длительно эксплуатировать при температуре 120÷130 °C, кратковременно - при 135÷150 °C. Пентапласт перерабатывают всеми методами на оборудовании, применяемом для термопластов. Коэффициент трения при давлении 5 МПа (температура 20 °C) для пары трения пентапласт-пентапласт составляет 0,13-0,15; для пары пентапласт-закаленная сталь - 0,11-0,13. Для повышения механических свойств в пентапласт вводят минеральные наполнители: графит, смолу, стекловолокно, окись хрома и др.

Полиформальдегидные смолы - терморезистивные полимерные материалы, применяемые для изготовления деталей узлов трения в машиностроении (шестерни, втулки, муфты сцепления, подшипники, сепараторы и др.). Эти материалы обладают высокой стойкостью по отношению к органическим растворителям, действию горячей воды, растворов солей, морской воды, щелочей, растворов органических кислот. Изделиям из полиформальдегидов свойственна высокая жесткость, стабильность размеров, высокая износостойкость, стойкость к старению; их можно эксплуатировать при температуре до 120°C. Коэффициент трения чистого полиформальдегида по стали без смазки - 0,30-0,35. Для повышения износостойкости и улучшения антифрикционных свойств полиформальдегид наполняют стекловолокном, фторопластом, дисульфидом молибдена, углеродным волокном, коксом, сажей, графитом. Введение в сополимер полиформальдегида 15-20% фторопласта снижает коэффициент трения в 1,5-2 раза, интенсивность изнашивания - в 3-4 раза.

Эпоксидные полимеры широко применяют при изготовлении деталей узлов трения. Они обладают хорошей адгезией к металлам и другим материалам, высокой механической прочностью, малыми усадкой и водопоглощением, вибро- и щелочеустойчивостью, хорошими электроизоляционными свойствами. В качестве наполнителей используют графит, кокс, дисульфид молибдена, нитрид бора, оксиды металлов, различные волокнистые материалы. Введение в эпоксидные смолы фурановых олигомеров и специальных добавок увеличивает твердость, жесткость, нагрузочную способность и износостойкость.

Композиционные материалы на основе эпоксидных смол применяют для изготовления деталей узлов трения, работающих в агрессивных средах и в вакууме при температурах от -100 °С до 200 °С, в воде, керосине и других средах.

Ещё одним классом трибополимеров являются полимерные самосмазывающиеся материалы.

Свойства материалов на основе фторопласта приведены в табл. 3.4., а на основе полиамидов - в табл. 3.5. Для повышения антифрикционных свойств полиамиды армируют и наполняют твердыми смазывающими материалами.

Таблица 3.4.

Характеристики материалов на основе фторопласта

Марка материала	Состав, %	Плотность ρ , кг/м ³	Прочность σ_b , МПа	Твердость НВ, кг/мм ²	Теплопроводность, C_p , Вт/(м·к)	Коэффициент трения, f	Интенсивность изнашивания, $J_h \cdot 10^9$
Ф-4		2,18÷2,21	14,0÷35,0	30÷40	0,2	0,04	80÷100

Ф4К20	Ф-4, 80 Кокс, 2					0,06	0,75÷1,0
Ф4М15	Ф-4, 85 MoS ₂ , 15	2,25	13,5	50	—	0,07	0,5÷1,8
Ф4С15	Ф-4, 85 Стекло- волокно рубл. 15	2,20	11-14	50÷60	—	0,08÷0,0 9	1,7÷2,0
Ф4К15 М5	Ф-4, 80 Кокс, 15 MoS ₂ , 5	2,19	14	40	—	0,08÷0,0 9	1,7÷2,0
АМИП -15М	Ф-4, Сигал, MoS ₂ Ф-4, никель,	2,25	10÷14	46÷80	0,35	0,1÷0,12	1,8÷2,1
ФН-202	Нитрид бора, MoS ₂ Ф-4, 82	2,40	11÷18	40÷70	0,30	0,12÷0,1 5	28÷32
КРИОЛ ОН-3	Углеродное волокно, 5 MoS ₂ , 3	2,21	22÷25	55÷60	0,36	0,08÷0,1	0,5÷0,7
КВН-3	Ф-4, бронза, PbO, кокс, MoS ₂						

Таблица 3.5.

Характеристики материалов на основе полиамида

Марка материала	Состав	Плотность, ρ, кг/м ³	Прочность σ _в , МПа	Удельная вязкость КС, кДж/м ³	Твердость НВ, кг/мм ²	Предельная рабочая температура, °С
ПА 6-1-203	ПА, графит	1,15	60÷72	18÷50	130	-60 ÷ 165
ЛАМ-1	ПА, графит, алюминевая пудра	1,18	53	20	200	-60 ÷ 165
ПА12-11-13	ПА, MoS ₂	1,03	49	3-7	85	-60 ÷ 165
ПА66ПЭ	ПА, полиэтилен	1,13	70	4	110	-40 ÷ 80
ПА610-1-103	ПА, графит	1,12	55	50÷80	—	до 120
ПА610-1	ПА, стекловолокно, MoS ₂	1,35	125	20÷50	—	до 120
САМ-3	ПА, добавки	1,30	55	40÷50	130	до 100
САМ-5	ПА, графит, добавки	1,16	47	35÷51	95	до 100
ПНС610-Т10	ПА, тальк	1,16	50÷60	50÷80	—	до 120
МАСЛЯНИТ КСПЭ	ПА, стекловолокно, полиэтилен, медь	—	—	30	80	-50 ÷ 200

Материалы на основе полиамидов

Полиамиды отличаются высокой термической и термоокислительной устойчивостью. Они начинают разлагаться на воздухе только в области температур 350 – 450°С, а в вакууме или инертной среде - при 500°С. Полиамиды относятся к самым радиационностойким материалам, что в сочетании с малой летучестью делает их перспективными для применения в узлах трения, работающих в вакууме. Изделия из полиамидов могут

длительно эксплуатироваться при температуре 200÷260°C. Например, полиамид ПМ-69 сохраняет 90% прочности при изгибе после 500 ч работы при 250°C и после 100 ч работы при 300°C. Ценным свойством полиамидов является высокое сопротивление ползучести, особенно при высоких температурах. Возможность применения полиамидов для изготовления деталей высокой точности обеспечивается их малой усадкой (0,7-1,0%) при прессовании и спекании и небольшим (0,2-0,3%) водопоглощением.

В табл. 3.6 приведены составы и основные свойства самосмазывающихся композиционных материалов на основе полиамидов. Коэффициент трения этих материалов с увеличением скорости скольжения снижается. Детали узлов трения получают горячим прессованием. Для изготовления пористых изделий, например подшипников, к полиамиду добавляют полиформальдегид. При температуре до 340 °С наиболее эффективно работают композиции, содержащие 45% графитированного

Таблица 3.6.
Характеристики материалов на основе полиамида

Марка материала	Состав материала	Плотность ρ , г/см ³	Прочность σ_b , МПа	Ударная вязкость КС, кДж/м ²	Твердость НВ, кг/мм ²	Предельная рабочая температура, °С
Полиар-2	ПМ-67, MoS ₂	1,3	—	50	140	-196 ÷ 300
Тесан-38	ПМ-69, MoS ₂	1,3	—	30	140	-196 ÷ 250
ПМ-67-ДИ-3	ПМ-67, MoS ₂	1,43	90÷130	20÷70	210÷310	-196 ÷ 250
ПМ-69-ДМ-3	ПМ-67, MoS ₂	1,45	85÷120	30÷50	210÷280	до 250
ПМ-67-Г10	ПМ-67, графит	1,45	70÷98	8÷30	230÷330	до 250
ПМ-69-Г5	ПМ-69, графит	1,47	70÷90	20÷40	220÷330	до 250
ПАМ 15-67	ПМ-67, графит	1,42	80÷100	16÷30	300	-196 ÷ 250
ПАМ 15-69	ПМ-69, графит	1,42	65÷80	7,8	330	-196 ÷ 250
ПАМ 50-67	ПМ-7, графит, нитрид бора	1,62	44÷45	1,5÷5,0	270÷300	-196 ÷ 250
ПАМ 50-69	ПМ-69, графит, нитрид бора	1,5÷1,6	30÷38	5,0	300	-196 ÷ 250

волокна (коэффициент трения снижается до 0,05 - 0,10) при допустимом контактом давлении 350 МПа.

Подшипники, изготовленные из наполненного полиамида с хаотично ориентированными графитированными волокнами, надежно работают при давлении до 28,5 МПа и имеют износостойкость при 50 и 315 °С соответственно в 7 и 1,5 раза большую, чем в случае ориентации графитовых волокон вдоль направления скольжения. Для работы в области криогенных температур применяют полиамиды, наполненные бронзой. Фирма "Баден"

(США) разработала самосмазывающиеся шарикоподшипники, работоспособные в интервале температур $-50 +260$ °С при частоте вращения до 800 с^{-1} . Сепаратор этих подшипников изготавливают из пористых полиамидных материалов SP-8 и SP-811.

Недостатком материалов на основе полиамидов является большая скорость газовой выделения, что в некоторых случаях ограничивает их использование в вакуумной технике, а также хрупкость, предъявляющая особые требования к технологии обработки деталей. Кроме того, эти материалы имеют высокую стоимость. Поэтому их применяют лишь для изготовления ответственных деталей подвижных сопряжений, работающих в экстремальных условиях.

Материалы на основе поликарбоната

Композиционные материалы на основе поликарбоната относятся к перспективным для деталей узлов трения благодаря высоким механической прочности и ударной вязкости, стабильности свойств и размеров деталей в широком интервале температур, стойкости к атмосферным воздействиям. Эти материалы устойчивы к ультрафиолетовому излучению и резким перепадам температур, но имеют ограниченную стойкость к действию ионизирующего излучения.

Материалы на основе поликарбоната применяют для деталей уплотнений, клапанов и других элементов, работающих в вакууме, в инертной газовой и других средах при температурах $-50 \div 110$ °С. В табл. 3.7 приведены состав и свойства некоторых материалов на основе поликарбоната.

Таблица 3.7.

Материалы на основе поликарбонатов

Марка материала	Основные компоненты	Плотность, г/см ³	Прочность, МПа	Ударная вязкость, кДж/м ²	Твердость НВ, кг/мм ²	Предельная рабочая температура, °С	Метод переработки
ДАК-8	Поликарбонат, фторопласт-4	1,23	50÷55	105	87	115	Литье под давлением
Эстеран-29	Поликарбонат, MoS ₂	1,30	—	6	200	110	Прессование
Эстеран-35	Поликарбонат, MoS ₂	1,41	52	30÷70	140	110	Литье под давлением
Эстеран-51	Поликарбонат, MoS ₂	1,25	60	100÷200	100	110	Литье под давлением
ДАК-12-3BN	Поликарбонат, BN	1,20	55	—	90	110	Литье под давлением
ДАК-УП5Д	Поликарбонат, графит	1,25	90	—	—	—	Литье под давлением

Триботехнические характеристики композиционного материала ДАК-8 при трении на воздухе и в вакууме в различных контактных парах приведены в табл. 3.8.

Для снижения коэффициента трения и повышения износостойкости в поликарбонат вводят специальные наполнители и твердые смазки. Введение дисульфида молибдена, графита или 15-20% фторопласта - 4 снижает коэффициент трения в 2-3 раза. К недостаткам поликарбоната следует отнести склонность к образованию микротрещин в поверхностном слое под влиянием остаточных напряжений после механической обработки и вследствие инородных включений и микропор. Поэтому обязательной финишной операцией должна быть термообработка для снятия остаточных напряжений.

Таблица 3.8.

Результаты испытаний поликарбоната ДАК-8

Контактная пара	Материал контртела	Давление среды, Па	Контактное давление, МПа	Скорость скольжения, м/с	Коэффициент трения	Интенсивность изнашивания, 10^{-6}
Диск-сфера	сталь ШХ15	10	0,3	0,5	0,11	2,54
		10	0,3		0,12	123
Палец-диск	Сталь 12Х18Н10Т	10	0,3	0,5	0,08	13,0
		10	0,3		—	43,8
		10	1,0		0,14	0,029
		10	1,0		0,12	0,110
		10	2,0		0,15	0,37
		10	2,0		0,11	—
Торцовая Диск-диск	Сталь 12Х18Н10Т	10	1,0	0,5	0,04	0,27
		10	1,0		0,07	50
		10	2,0		0,06	67,6
		10	2,0		0,05	87,8

Материалы на основе полиэтилена

Термопластичный полиэтилен используется в качестве полимерной основы композиционных самосмазывающихся материалов благодаря своей низкой адгезионной способности, достаточно высокой механической прочности, химической инертности и хорошей технологичности. Наибольшее применение получил полиэтилен низкого давления (ПЭНД), имеющий более упорядоченную структуру макромолекул, более высокую степень кристалличности (75-85%), плотность, механическую прочность, модуль упругости при изгибе и теплостойкость.

Для улучшения триботехнических характеристик в ПЭНД вводят фторопласт-4, гексафторэтилен, дисульфид молибдена, графит, пентапласт, поликарпоамид, металлы.

В табл. 3.9. приведены основные физико-механические и триботехнические характеристики ПЭНД.

Характеристики ПЭНД

Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа	Относительное удлинение, %	Модуль упругости при растяжении, МПа	Ударная вязкость, кДж/м ³	Твердость НВ, кг/мм ²	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Интенсивность изнашивания, ·10 ⁻⁹	Коэффициент трения
0,95	24÷42	50÷12000	650÷750	2÷120	49÷60	0,42÷0,44	1,75	0,1÷0,15

Экспериментальные исследования композиционных материалов на основе полиэтилена показывают, что повышение износостойкости у большинства композиций не сопровождается улучшением механических свойств, а в ряде случаев прочность и модуль Юнга снижаются при резком повышении износостойкости. У изделий из материала с волокнистым наполнителем значительно повышается размерная стабильность, а при использовании в качестве наполнителей металлических порошков резко увеличиваются теплопроводность, электропроводность и некоторые другие характеристики.

Материалы на основе полиарилатов

Широкое применение в машино- и приборостроении находят антифрикционные самосмазывающиеся материалы на основе полиарилатов для изготовления деталей подшипников скольжения и качения, предназначенных для работы в глубоком вакууме без смазки.

Полиарилаты марок Ф-1, Ф-2, Д-3, Д-4 и др. в чистом виде имеют высокий коэффициент трения (0,35÷0,40) и относительно невысокую износостойкость. С целью улучшения триботехнических характеристик и повышения теплостойкости в полиарилат добавляют фосфор, дисульфид молибдена, медь и серебро. Например, композиционный материал Делан-524 на основе полиарилата ДВ-101 с добавкой 15% (массовая доля) дисульфида молибдена обладает самой высокой теплостойкостью среди полимерных материалов, перерабатываемых литьем под давлением.

Чистый полиарилат марки ДВ имеет нестабильные триботехнические характеристики из-за высокой величины адгезионной составляющей силы трения в результате наличия гидроксильных групп и макромолекул.

Материалы на основе эпоксидных смол

Композиционные материалы на основе эпоксидных смол нашли применение для деталей трибосопряжений вследствие хорошей адгезии эпоксидных полимеров к металлам и другим материалам, высокой механической прочности, малой усадки и водопоглощения. Наряду с традиционными наполнителями (графит, кокс, дисульфид молибдена, оксиды металлов, различные волокнистые материалы и т.п.) в эпоксидные смолы вводят олигомеры, полиэтилен, кремнийорганические смолы, двуокись титана и другие специальные добавки, что значительно увеличивает твердость, жесткость, нагрузочную способность и износостойкость

композиционных материалов. Свойства некоторых антифрикционных материалов на основе эпоксидных смол приведены в табл. 3.10.

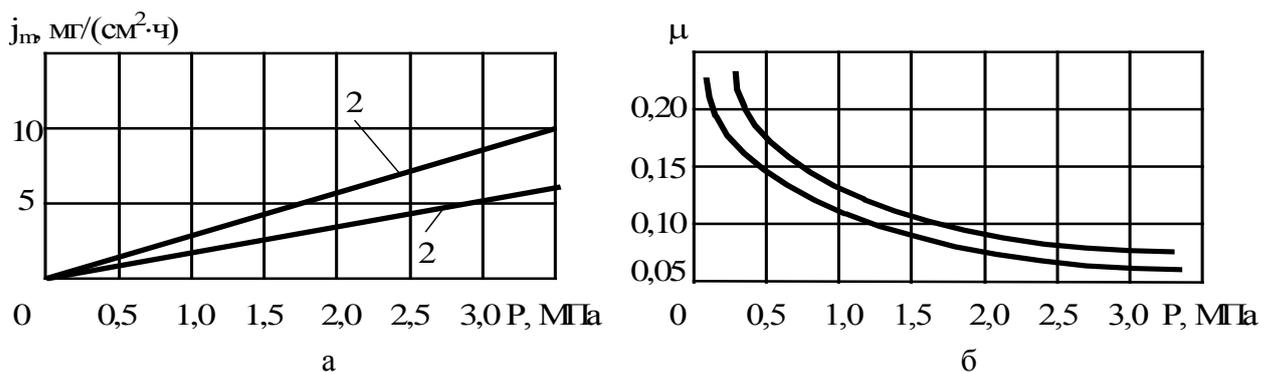
Наиболее широкое применение получили композиционные материалы марок АМС-1, АМС-3, АМС-5М, отличающиеся высокой механической прочностью, износостойкостью, термостойкостью и низким коэффициентом трения. Из этих материалов изготавливают поршневые кольца компрессоров, работающих без смазки, торцевые уплотнения, подшипники скольжения для узлов сухого трения с нормальной влажностью при повышенных температурах, лопатки воздушных ротационных насосов.

Таблица 3.10.

Материалы на эпоксидной основе

Марка материала	Основные компоненты	Плотность, кг/м ³	Предел прочности МПа	Номинальное контактное давление, МПа	Скорость скольжения, м/с	Интенсивность изнашивания, 10 ⁻⁸	Коэффициент трения
АМС-1	Эпоксидкремний - органич. смола, кокс, нитрид бора	1,77	—	5,0	0,5	0,1	0,08
АМС-3	Эпоксидкремний – органич. смола, электродный графит, кристаллический графит	1,79	—	5,0	0,5	0,22	0,10
АМС-5М	Эпоксидкремний - органич. смола, углеродная ткань	1,23	—	2,0	0,5	0,05	0,11
ЭДМА - 10	Эпоксидная смола, наполнитель	1,90	8,0	2,0	0,06	2,0	0,23
Э10Н5	Эпоксидная смола, графит, никель	1,35	9,5	0,65	1,0	1,2	0,35

Триботехнические характеристики материалов значительно зависят от условий эксплуатации. На рис. 3.1. приведены зависимости массовой скорости изнашивания и коэффициента трения от номинального давления при трении без смазки по стали 45 при скорости скольжения 1 мс.



Р и с. 3.1. Зависимость скорости изнашивания (а) и коэффициента трения (б) от номинального контактного давления для материалов: 1- АМС -1, 2 -АМС-3

Повышение температуры от 50 до 250 °С вызывает снижение коэффициента трения композиционных материалов в 1,5÷2 раза, при дальнейшем повышении температуры до 300 °С коэффициент трения практически не изменяется или незначительно возрастает.

Материалы на основе фенолформальдегидных полимеров (ФФП)

Фенолформальдегидные полимеры (ФФП) широко применяют при создании антифрикционных полимерных материалов вследствие их повышенной термической и химической стойкости и износостойкости. Для улучшения триботехнических свойств вводят специальные наполнители (графит, свинец, MoS_2 , оксиды алюминия, железа и меди, а также базальтовые, стеклянные и углеродные волокна, технический углерод, асбест, различные волокна), что позволяет получить самосмазывающиеся материалы с низким коэффициентом трения без смазки (0,04-0,06) и интенсивностью изнашивания (10^{-9} - 10^{-11}) для подшипников скольжения, уплотнений, направляющих, работающих при повышенных температурах. Известны самосмазывающиеся материалы на основе ФФП следующих марок: АТМ-1, АТМ-1Т, Вилан-9Б, Синтек-2, АМАН-24. Материал марки АТМ-1 обладает высокими износостойкостью и теплопроводностью, но он хрупок, и поэтому его применяют в узлах трения, не работающих при ударных нагрузках. Для устранения этого недостатка используют волокнистые наполнители (углеродные и органические волокна) или ткани, например, в материалах марки Синтек.

3.5. Композиционные материалы на основе бора.

Перспективными являются композиционные материалы системы Al - В. Алюминий, бор и их соединения имеют низкую плотность и обладают высокой износостойкостью. Технология производства материалов с содержанием бора до 30%, основанная на введении в расплавленный рафинированный и защищённый флюсом алюминий гранул боридов (Al B_2 и Al B_{12}) размером от 5 до 30 мкм со скоростью, которая обеспечивает поддержание температуры алюминия на уровне, несколько превышающем температуру его затвердевания, является наиболее типичной. Перед охлаждением композицию, состоящую из жидкого алюминия и частиц бора, подвергают раскислению. Этот технологический процесс является сложным и дает предел прочности материалов, содержащих 10% бора – 170 мПа, а при 30% бора – 120 мПа.

В процессе совершенствования технологии между компонентами смеси – алюминием, магнием, борсодержащей добавкой и ПАВ – протекают механически и термически активируемые реакции, в результате которых образуются оксиды, карбиды и бориды (Al_2O_3 , Al_4C_3 , Al B_2 , Al B_{12} и B_4C), находящиеся в ультрадисперсном состоянии равномерно распределенные в основе. Механически легированные композиции находятся в гранулированном состоянии. Размер гранул зависит от количества борсодержащей добавки (40-2%) и изменяется в пределах 0.3-1.4 мм;

гранулы имеют высокую микротвердость. Она зависит от содержания оксида B_2O_3 и бора в композиции и изменяется в пределах от 1200 до 1900 мПа.

Гранулированные композиции являются дисперсно-упрочненными. Упрочняющими фазами являются Al_2O_3 , $Al B_2$, $Al B_{12}$, Al_4C_3 и B_4C . Карбиды алюминия и бора образуются в результате взаимодействия между бором и алюминием, бором и углеродом, которые входят в состав ПАВ. Оксиды, бориды и карбиды в гранулированных композициях находятся в дисперсном состоянии – размер частиц не превышает 0.1 мкм. Основой гранулированной композиции является алюминий с размером зерен менее 0.2 мкм.

Дисперсно-упрочненные гранулированные композиции, полученные методом механического легирования, стойки к отжигу, а длительный отжиг при температурах до $550^{\circ}C$ повышает твердость композиций примерно на 5%. При температурах выше $650^{\circ}C$ наблюдается процесс разупрочнения, который становится заметным после термической обработки гранулированной композиции.

Ультрадисперсное состояние и равномерное распределение боридных фаз обуславливают высокую прочность материалов на основе систем алюминий-бор-кислород и алюминий-бор.

Легирование B_2O_3 в количестве примерно 7% (около 2.3% В) показывает высокую эффективность для получения жаропрочных дисперсно-упрочненных конструкционных материалов. Дополнительное легирование магнием (5%) приводит к увеличению прочности материала до 630 мПа. Существенный рост прочности обусловлен большим сродством магния, по сравнению с алюминием, к кислороду, что способствует более полному протеканию реакции восстановления B_2O_3 с образованием дисперсной упрочняющей фазы MgO.

Среди керамик инженерного назначения большой интерес представляют монофазные материалы и композиты на основе карбидов бора (B_4C , $B_{13}C_2$), которые могут использоваться в автотракторном машиностроении, в условиях сильных абразивных воздействий.

При этом элементный состав порошков карбида бора по результатам химанализа смеси следующий

Формульный состав	Содержание элементов, % (мас.)						
	$B_{об}$ щ.	$C_{об}$ щ.	$C^*_{св}$ об.	Fe	Ca	O *	Si
B_4C	77. 5	21. 3	1.2	1.2 8	0. 1	0. 1	0. 3
$B_{13}C_2 + B_4C$	80. 7	17. 4	0.5	-	-	0. 1	-

*кислород находится в виде B_2O_3

Диапазон размеров частиц основной фракции карбида бора, в смеси после обработки в мельнице, составляет 0.35 – 1.5 мкм.

Частицы B_4C имеют полиэдрическую форму с высокой плотностью ступеней на поверхностях огранки.

Прессование образцов деталей проводится при температуре 2100⁰С и давлении 35 мПа. Длительность спекания колеблется от размеров и сложности конфигурации деталей от 10 до 30 мин.

Увеличение прочности образцов В₄С обусловлено проявлением решеточной пластичности в карбиде бора и значительным ростом прочности пористых образцов при T = 1600⁰С. Положительная роль внутризеренных пор в упрочнении образцов может проявляться в повышении пластичности материала.

Все карбиды, нитриды, бориды (табл. 3.11) имеют высокую твердость, чем и объясняется увеличение износостойкости сплавов при наличии в них этих твердых частиц, чем выше их твердость, тем выше износостойкость материала. Например, бор оказывает рафинирующее действие на расплав связки, способствует активации процесса спекания карбидохромового сплава. Это улучшает механические свойства сплава: прочность при изгибе возрастает в 1,2 раза, ударная вязкость – примерно в 3 раза, увеличивается твердость. Из этих материалов готовят детали строительно-дорожных машин работающие в условиях комбинированного абразивного изнашивания и агрессивной среды. Однако содержание твердой фазы в сплавах должно быть оптимальным. Не всегда справедливо утверждение, что износостойкость повышается при неограниченном увеличении в сплаве твердой фазы.

Свойства некоторых переходных металлов, их боридов, карбидов, нитридов

Таблица 3.11

металл	Микротвердость, кг/мм ²			Температура плавления, °С			
	бориды	карбиды	нитриды	металлы	бориды	карбиды	нитриды
Ti	3370	3000	2160	1660	2980	3250	2950
V	2080	2094	1520	1700	2400	2830	2320
Cr	1800	1300	2640	1800	1900	1895	1500 (разлаг.)
Zr	2250	2836	1983	1930	3040	3175	2980
Mo	2350	1479	-	2622	2100	2690	разлаг.
W	266	2400	-	3377	2300	2600 (разлаг.)	-

Материалы, работающие в условиях абразивного изнашивания должны сочетать в себе твердость и пластичность. Перспективным в этом направлении является нитридное упрочнение. Нитриды наряду с высокой твердостью имеют высокую пластичность. Это объясняется наличием относительно высокого веса нелокализованной части электронов, участвующих в статистическом обмене с локализованными электронами. В данном случае это аналогично снижению хрупкости и повышению пластичности в ряду С (алмаз) Si- Ge – Sn - Pb. В этом ряду уменьшается локализация валентных электронов на стабильных конфигурациях,

обуславливающих жесткие, направленные связи, увеличивается вес нелокализованных электронов, обеспечивающих связь с локализованными, входящими в стабильные конфигурации и, следовательно, с остовами атомов. Иначе говоря, у нитридов переходных металлов большая способность узлов кристаллической решетки к перемещению при деформации без разрыва межатомных связей, т.е. без разрушения материала.

Кроме того, повышение пластичности происходит за счет выпадения высокодисперсных (от 1 до 8 мкм) нитридов, которые располагаются по всему объему наплавки равномерно и являются дополнительными центрами кристаллизации.

Следовательно, перспективным с точки зрения повышения износостойкости, обеспечения пластичности и исключения хрупкости сплавов является их нитридное упрочнение. Получение нитридов и карбонитридов происходит за счет взаимодействия азота с сильными нитридообразующими элементами.

Известно, что к азоту в сталеплавильном производстве было исключительно отрицательное отношение, в связи с этим предпринимались все меры, способствующие защите металла от азотсодержащей среды.

В последние года металлурги стали замечать, что в ряде случаев азот положительно влияет на механические свойства стали. В связи с этим начали разрабатываться технологические методы ввода азота с целью легирования металла. Все существующие в настоящее время способы ввода азота усложняют технологию и повышают себестоимость готового металла.

В связи с этим представлялось целесообразным разработать новую технологию легирования азотом металлов и сплавов.

Идея легировать сплавы азотом непосредственно из воздуха возникла на основании многочисленных, особенно в последнее время, работ сварщиков, заметивших высокое поглощение азота металлом сварочной ванны. В этих работах показано, что при сварке самозащитной порошковой проволокой происходит взаимодействие электрода и сварочной ванны с азотом воздуха.

Отрабатываются режимы сварки, при которых азота в сварочном шве растворяется меньше.

Известно, что большое сродство к азоту имеют некоторые переходные металлы - Ti, Zr, V. Для установления влияния этих элементов на образование нитридов из азота воздуха изготавливалась серия сплавов систем легирования Fe-C-Ti, Fe-C-V, Fe-C-Zr.

С ростом содержания Ti от 0,5 до 3% (рис. 3.2) при содержании C 0,1%, твердость наплавленного металла изменялась постепенно, возрастая от 230 HV до 328HV (на 12%), что указывает на увеличение количества твердой фазы. Увеличение содержания углерода до 0,6%, дает незначительное повышение твердости по сравнению с теми же составами, но при содержании углерода 0,1% (твердость возрастает на 4%). Следовательно, на твердость наплавки больше влияние оказывают нитриды Ti, чем карбиды. Исследование включений было произведено на приборе "ESCALAB". На

глубине 50 Å обнаружены соединения Ti N (рентгеноэлектронная линия Ti 2P E= 455 эВ.).

Кроме того, наличие нитрида алюминия и Ti в исследуемых сплавах подтвердилось результатами анализа скоплений частиц. Его проводили при линейном сканировании микронзонда MS- 46 фирмы "Cateca" через анализируемое скопление частиц, записывая кривые распределения интенсивностей характеристического рентгеновского излучения K_α - линий азота, Al, Ti, Fe при ускоряющем напряжении 10 кВ.

На рис. 3.3 показана зависимость износостойкости от различного содержания Ti и C. Повышение содержания C в наплавленном металле не приводит к существенному- повышению износостойкости, но повышение количества Ti кратно увеличивает износостойкость. Такой же характер изменения твердости и износостойкости наблюдается у сплавов с легирующими элементами Zr и V, причем твердость и износостойкость сплавов с основным легирующим элементом Zr выше, чем у Ti, а у сплавов на основе Ti эти характеристики выше, чем у сплавов на основе V. Эти данные убедительно свидетельствует о том, что повышение твердости растет за счет увеличения доли нитридной фазы. Из вышесказанного следует, что наиболее сильным абсорбентом азота и наиболее сильным нитридообразующим элементом является цирконий. Однако цирконий является дефицитным легирующим элементом, поэтому в качестве нитридообразующего был выбран титан.

С целью установления влияния режимов наплавки на образование в процессе кристаллизации твердых частиц - нитридов и карбонитридов проводились исследования материалов, наплавленных при различных токе, напряжении и скорости наплавки.

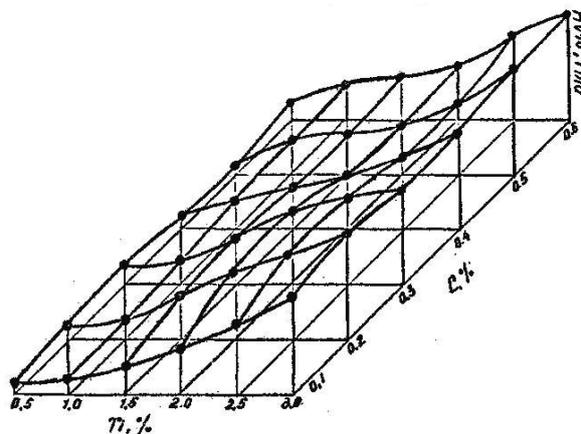


Рис.3.2. Диаграмма изменения твердости образцов, легированных титаном и углеродом

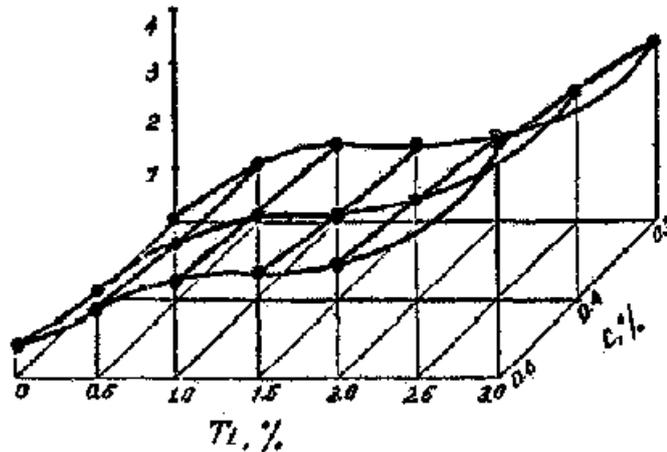


Рис. 3.3. Зависимость износостойкости наплавленного металла от содержания титана и углерода.

Установлено, что при наплавке одной порошковой проволокой увеличение тока от 300 до 1000 А приводит к уменьшению количества твердой фазы. То же самое происходит при смене тока от прямой полярности к обратной. Этот факт говорит о том, что при наплавке происходят растворение азота не только в виде нейтральных но и заряженных частиц. Так как при дуговых методах наплавки в зоне дуги происходит диссоциация молекул азота и появление реакционно способных ионов, растворение последних в ванне жидкого металла весьма желательно. Следовательно, наплавку необходимо производить на токе прямой полярности. Уменьшение количества твердой фазы при увеличении тока объясняется тем, что при большом токе температура ванны металла выше, а образование нитридов происходит при температурах - от 800 до 1000°. В связи с тем, что уменьшение тока меньше 300 А является нецелесообразным из соображений производительности механизированной наплавки, ток принимался 300 А. С повышением напряжения дуги ширина валика наплавки и площадь наплавляемой поверхности возрастают по прямолинейному закону; увеличение поверхности, контактирующей с азотом воздуха приводит к увеличению содержания растворенного азота. Возрастание напряжения более оптимального (32-34В) вызывает ухудшение формирования наплавленного слоя и появление подрезов.

Известен способ автоматической дуговой наплавки в потоке воздуха. Он заключается в том, что в зону дуги, горящей между изделием и плавящимся электродом, подается дополнительная струя воздуха, в результате чего металл шва дополнительно насыщается азотом воздуха. Несмотря на это, наплавка оказывается достаточно плотной. Этот эффект подавления пористости пока не выяснен. В работах выдвинуты различные гипотезы о дегазации, торможения развития газовой фазы. В данной работе было установлено, что при дополнительном вводе струи воздуха в зону наплавки в наплавленном металле образуются нитриды Fe, а при наличии нитридообразующих -соответственно нитриды этих элементов. Роль струи

воздуха в этом процессе заключается в охлаждении поверхности ванны жидкого металла и быстром достижении той температуры, при которой происходят реакция образования нитридов. Увеличение расхода воздуха улучшает качество наплавки, но чрезмерная подача его приводят к выгоранию углерода из наплавленного металла. Поэтому расход воздуха необходимо определять режимом наплавки.

В связи с образованием нитридной фазы в наплавленном металле скорость подачи порошковой проволоки является важным параметром режима наплавки. Чем меньше скорость подачи, тем больше время существования расплавленной ванны и больше времени на протекание реакции между азотом и легирующими элементами. Скорость подачи проволоки должна быть минимальной с учетом производительности процесса.

Ведущая роль азота в образовании пористости при огарке и наплавке порошковыми проволоками является в настоящее время общепризнанной. При наплавке и сварке порошковыми проволоками защита плавящегося металла от воздействия воздуха комбинированная - газошлаковая. Изучению этого вопроса уделяют внимание многие исследователи

Известно, это более сильный и направленный поток газов при наплавке порошковыми проволоками способствует повышению частот отрыва капель и уменьшению их размеров. В крупных каплях растворяется азота больше, чем в мелких, поэтому необходимо в состав шихты вводить меньше веществ, которые диссоциируют с большим выделением газов. Это, в первую очередь относится к мрамору, который входит в состав многих порошковых самозащитных проволок и в покрытия электродов. При разработке самозащитной порошковой проволоки мрамор был исключен из числа компонентов защиты.

Присутствие в шихте Ca F_2 также приводит к образованию газовой фазы, однако исключить это вещество из системы защиты нельзя, так как оно необходимо для защиты от водорода (при диссоциации Ca F_2 образуются ионы Ca^{+2} и 2F^{-1}), F и H образуют нерастворимое соединение HF , которое выводится со шлаком, а малые количества Ca играют роль технологических добавок, оказывающих существенное модифицирующее и рафинирующее воздействие на металл.

Содержание серы в металле понижают введением марганца, образующего нерастворимый в жидком металле сернистый марганец, который переходят в шлак. Наличие в металле марганца и хрома увеличивает количество растворенного азота - в 3 раза. Для раскисления металла вводили Al , TiO_2 .

Таким образом, определение оптимального состава шлаковой фазы является весьма серьезным при разработке самозащитных порошковых проволок для нитридного упрочнения.

Таким образом, при разработке материала для наплавки на основе образования нитридов главным легирующим элементом выбран Ti , основа - Fe , с добавками Mn и Cr , для увеличения количества твердой фазы вводился

В. Оптимальный состав был определен с помощью метода математического планирования эксперимента. Изучали зависимость износостойкости от состава наплавленного металла по основным компонентам - Ti, C, Cr, B. Локальную область определения факторов установили из априорных соображений. Результаты исследования абразивного изнашивания при введении в сплав бора дали возможность оценить его влияние и определять оптимальное его количество.

С повышением содержания карбида бора в шихте твердость наплавленных слоев возрастает, а интенсивность изнашивания снижается. Несомненно, свойства наплавленного слоя определяются природой упрочняющей фазы.

В работе исследовались основные закономерности изнашивания опытных сплавов при трении скольжения по абразиву. Особый интерес вызывает установление связи износостойкости сплавов с их удельным электросопротивлением; эта характеристика оказалась структурно-чувствительной в принятой системе легирования.

Эти данные позволяют сделать вывод о решающем влиянии структурного фактора на величину износа при трении скольжения. Как следует из рис. 3.4, между относительной износостойкостью и удельным электросопротивлением существует прямая корреляционная связь. На прямой 2 расположены точки, характеризующие сплавы с наличием твердой фазы до 30% в аустенитно-мартенситной матрице. Прямая 1 заканчивается точками, характеризующими сплавы с аустенитно-мартенситной матрицей без наличие твердой фазы.

На основании этих данных можно сделать вывод, что ступенчатое повышение износостойкости произошло из-за наличия твердой фазы при одном и том же удельном электросопротивлении $\rho = 75 \cdot 10^{-8}$ ом·м. Из двух сплавов, имеющих аустенитно-мартенситную матрицу, более износостойким будет сплав, имеющий значительное количество твердой фазы. Величина повышения износостойкости будет характеризовать количество твердой фазы.

Таким образом, удельное электросопротивление может быть использовано в качестве критерия износостойкости при выборе материалов.

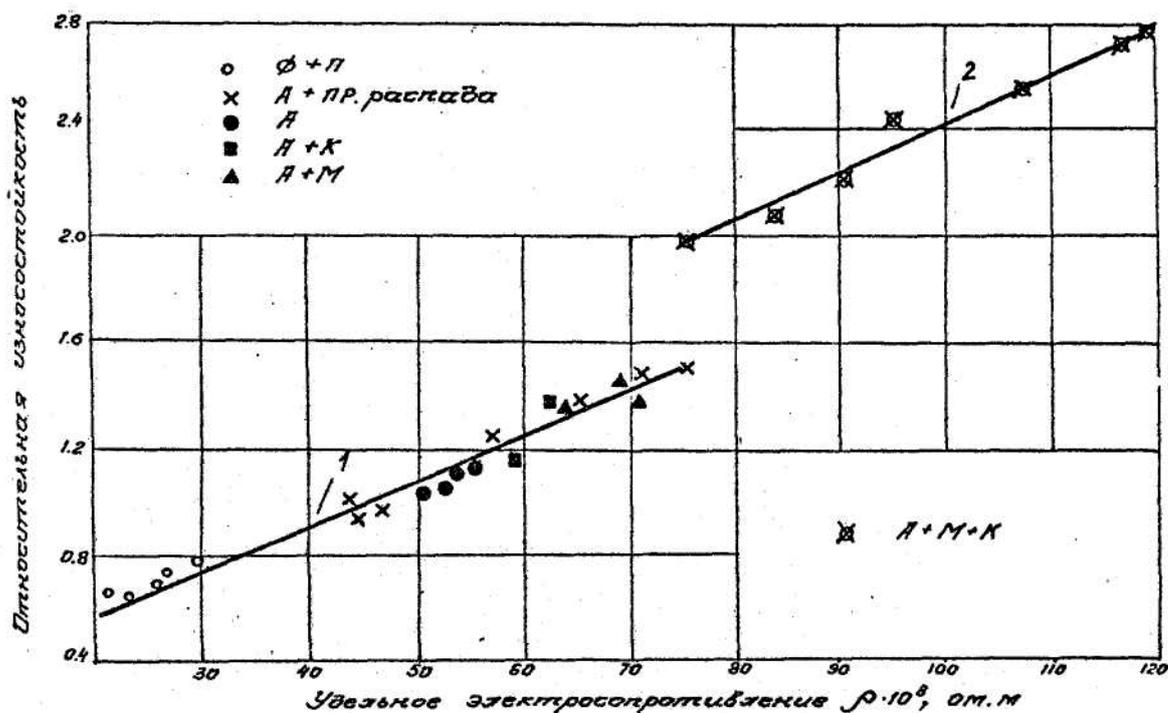


Рис. 3.4. Влияние удельного электросопротивления наплавки на их износостойкость при трении скольжения по абразиву

При абразивном изнашивании размеры контакта зерен абразива и фаз соизмеримы между собой, способность таких материалов к разрушению в значительной мере определяется строением и свойствами отдельных фаз. В большей степени на износостойкость материала влияют свойства твердых фаз (карбидов, карбоборидов, нитридов и т.д.). Механизм изнашивания зависит от количества твердых частиц, их расположения и строения. Это объясняется тем, что при абразивном изнашивании в зоне фрикционного контакта имеют место упругое и пластичное отеснение, микрорезание и микроцарапание, многократное передеформирование локальных объемов металла и их последующее удаление в виде продуктов износа. При прохождении зерна по поверхности пластичных материалов происходит отеснение металла с образованием лунки. При прохождении абразива по поверхности твердых и хрупких материалов на них образуются царапины с равными краями, сколами и сеткой микротрещин. При столкновении с абразивом эти микротрещины развиваются и являются началом разупрочнения и причиной отрыва частиц металла.

Механизм влияния совместного упрочнения сплавов боридами и нитридами на износостойкость наплавленного металла заключается в том, что повышаются пластические свойства материала. Это происходит за счет того, что с появлением мелкодисперсной нитридной фазы, выпадающей в высокотемпературной области, появляется возможность образования компактной и более износостойкой карбидной и боридной фазы, которая располагается равномерно по всему объему наплавки. Механизм изнашивания таких сплавов заключается в том, что мелкодисперсная фаза

лучше удерживается в матрице, так как границы зерен не отличаются большой протяженностью, а значит сцепление с матрицей прочное

3.6. Правила сочетания материалов

Подбор наиболее подходящих материалов для пар трения скольжения можно в каждом отдельном случае сделать только на основании тщательного сопоставления условий работы трущихся деталей, исходных свойств материалов и тех изменений, какие они претерпевают на поверхностях трения, а также при учете других обстоятельств. Сформулируем некоторые правила подбора материалов.

1. Сочетать твердый материал с мягким, имеющим температуру рекристаллизации ниже средней температуры поверхности трения при работе. При таком сочетании металлы хорошо противостоят заеданию и характеризуются высокой надежностью. Хорошие результаты дают пары хром — резина при смазывании минеральным маслом и водой и хром — бронза при использовании пластичных смазочных материалов.

2. Сочетать твердый металл с твердым (сочетание пар из азотированной, хромированной и закаленных сталей). Такие пары трения обладают высокой износостойкостью вследствие малого взаимного внедрения их поверхностей. Нанесение прирабочных покрытий повышает надежность пар в наиболее опасный период работы — во время приработки. Применение этих пар ограничивается скоростями скольжения. Высокая точность изготовления и сборки, значительная жесткость конструкции, тщательная приработка, улучшение условий смазывания значительно расширяют область применения пар трения из твердых материалов.

3. Избегать сочетаний мягкого материала с мягким, а также пар из одноименных материалов (незакаленная сталь по незакаленной стали, алюминиевый сплав по алюминевому, медный сплав по алюминевому, хром по хрому, никель по никелю, пластмасса по пластмассе), за исключением пар из политетрафторэтилена и полиэтилена. Подобные пары имеют низкую износостойкость и ненадежны в работе. При незначительных перегрузках в парах образуются очаги схватывания и происходит глубинное вырывание материалов с взаимным их налипанием на поверхности трения.

4. Применять в труднодоступных для смазывания конструкциях пористые, порошковые материалы и антифрикционные сплавы.

5. Применять в качестве фрикционных и антифрикционных материалов пластические массы. В ряде случаев они повышают надежность и срок службы узла трения, снижают массу конструкции и расход дефицитных цветных металлов, уменьшают вибрации и улучшают акустические свойства машин.

6. Стремиться путем выбора материалов пары трения, смазочных материалов и присадок к ним создавать при работе пары условия реализации режима избирательного переноса.

7. Учитывать возможность при эксплуатации наводораживания поверхностей трения, что резко снижает износостойкость и надежность

работы узла трения. Применять материалы, трудно поддающиеся наводороживанию.

8. Стальные детали узлов трения при окончательной доводке их поверхности подвергать финишной антифрикционной безабразивной обработке (ФАБО).

Вопросы по теме:

1. Каковы правила сочетания материалов для пар трения?
2. Охарактеризовать перспективные композиционные материалы на основе бора.
3. Дать информацию о применении фенолформальдегидных полимеров (ФФП) в узлах трения.
4. Для чего применяют материалы на основе полиарилатов и эпоксидных смол?
5. Дать особенности материалов на основе поликарбоната и полиэтилена.
6. С какой целью в узлах машиностроения применяют полимерные материалы?
7. Дать описание антифрикционных материалов, получаемых из порошков и пластмасс.
8. Дать общую характеристику применения металлических антифрикционных материалов в узлах трения машин.

Вопросы по самостоятельной работе:

Определить время, необходимое для снятия слоя, заданной толщины

Литература

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М., Машиностроение, 1989, с. 328
2. Лебедев О.В., Кадыров С.М. Цикл лекций по трибологии. Т., Укитувчи, 1995, с. 128
3. Лебедев О.В., Кадыров С.М. Основы трибологии. Т., изд. ТАДИ, 2000, 176 с.
4. Лебедев О.В., Турсунова Г.Х. Методические указания по выполнению курсовой работы. Т., изд. ТАДИ, 2008, с. 34
5. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машины. Справочник. М., Машиностроение, 1983, с. 320

4. Виды нарушения фрикционных связей

В соответствии с усталостной теорией изнашивания поверхностей рассматривается как результат нарушения фрикционных связей. Характер нарушения фрикционных связей зависит от ряда факторов, из которых основными являются отношение глубины внедрения (или величины сближения в контакте) h к радиусу единичной неровности и отношению тангенциальной прочности молекулярной связи τ к пределу текучести материала σ_T . При внешнем трении нарушение фрикционной связи происходит по поверхности раздела двух тел или по пленкам, покрывающим эти тела. И. В. Крагельский в предложенной им классификации для установившегося движения в условиях трения без смазки и при граничной смазке различает пять видов нарушения фрикционной связи (рис. 4.1).

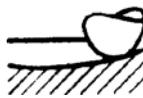
Характер деформирования	Упругое отеснение	Пластическое отеснение	Микрорезание	Адгезионное нарушение	Когезионный отрыв
Схема					
Число циклов (n), приводящие к разрушению основы	$n \rightarrow \infty$	$1 < n < \infty$	$n \rightarrow 1$	$n \rightarrow \infty$	$n \rightarrow 1$
Условие осуществления	$h/R < 0,01$ -для черных металлов $h/R < 0,0001$ - для цветных металлов	$h/R > 0,01$ - для черных металлов $h/R > 0,0001$ для цветных металлов	$h/R \geq \frac{1}{2} \cdot \left(f - \dots \right)$	$d\tau/dh > 0$	$d\tau/dh < 0$

Рис 4.1. Основные характеристики фрикционных связей по И. В. Крагельскому

Рассмотрим каждый характер деформирования из предложенной классификации:

1) упругое отеснение материала выступами контртела, которое встречается, когда напряжения в зоне контакта не превышают предела текучести. Разрушение материала (износ) в этом случае происходит в результате усталостных явлений;

2) пластическое отеснение материала, которое происходит, если контактные напряжения достигают предела текучести, но материал обтекает внедрившиеся выступы контртела. Износ в этом случае будет результатом малоциклового пластической передеформирования (малоцикловая фрикционная усталость);

3) микрорезание, которое происходит при достижении контактными напряжениями или деформациями разрушающих значений (нарушается режим обтекания выступов деформируемым материалом). Износ происходит

при однократном акте взаимодействия;

4) адгезионное нарушение фрикционной связи (разрушение схватывающихся пленок); оно не приводит непосредственно к разрушению, но влияет на величину действующих на контакте напряжений и деформаций, т. е. сопутствует усталостным процессам. Адгезионное нарушение происходит при прочности пленки, меньшей прочности основного материала, т. е. при положительном градиенте механических свойств $\frac{d\tau}{dh} > 0$;

5) когезионный отрыв, который возникает если прочность фрикционной связи (прочность пленки) выше прочности основного материала, т. е. при отрицательном градиенте механических свойств $\frac{d\tau}{dh} < 0$. В этом случае износ происходит в результате глубинного вырывания при однократном воздействии.

При микрорезании и когезионном отрыве износ максимальный, а при упругом контакте — минимальный.

Необходимо отметить и другие классификации процессов износа.

Первая классификация была предложена Бринеллем в 1921 г. В зависимости от кинематического признака и наличия прослойки между поверхностями он различал следующие виды изнашивания:

- 1) при трении качения со смазкой;
- 2) при трении качения без смазки;
- 3) при трении скольжения со смазкой;
- 4) при трении скольжения без смазки;
- 5) между двумя твердыми телами;
- 6) с разделением твердых тел промежуточным шлифующим порошком.

Необходимость постановки и решения тепловой задачи трения, износа и смазки вытекает из двух основополагающих триад и молекулярно-механической теории трения, усталостной и энергетической теории изнашивания, которые были разработаны И.В. Крагельским и Г. Фляйшером (1962 г.). Триады Крагельского предусматривают три взаимозависимых этапа фрикционного взаимодействия твердых тел:

- физико-химическая механика взаимодействия поверхностей твердых тел;
- изменение свойств материалов поверхностей сопряженных тел в результате трения с учетом влияния окружающей среды;
- разрушение поверхностных слоев контактирующих тел (изнашивание как следствие двух первых этапов).

Эта основная триада была дополнена второй триадой, предложенной А.В. Чичинадзе (1992 г.):

- поверхностные и объемные свойства материалов пары трения с учетом влияния окружающей среды;
- микро- и макрогеометрия контактирующих тел и коэффициент взаимного перекрытия пары трения;

- нагрузка, скорость скольжения, начальная, текущая объемная и поверхностная температуры и градиент температуры.

При импульсном нагружении скорость нагрева слоя толщиной до 10 мкм составляет $10^4 \dots 10^5$ град/с, а скорость охлаждения – $10^3 \dots 10^4$ град/с.

Локальные давления при этом достигают $(5 \dots 7) \cdot 10^5$ Н/см². Кратковременностью протекания процессов локального нагрева и охлаждения объясняется сохранение сопряженными деталями машин их несущей способности. Разрушение катастрофического характера в этих условиях не успевают произойти.

Повышение температуры детали при ударном нагружении вызывает протекание в её поверхностных слоях специфических структурных и фазовых превращений с возникновением так называемого «белого слоя». Зоны с максимальным значением температуры трения, согласно экспериментам, соответствуют зонам начального разрушения активных поверхностей деталей транспортных машин.

Рассматривая виды нарушения фрикционных связей нельзя не сказать о заеданиях при различных характерах деформирования.

Заедание вследствие схватывания является распространенным и опасным явлением в подвижных сопряжениях машин при контактно-фрикционном взаимодействии.

Анализ триботехнических свойств металлов, металлоподобных соединений и композиционных материалов на металлической связке позволяет сформулировать следующее:

- для всех пластичных материалов при трении и статическом контактировании под нагрузкой характерно проявление схватывания, заключающегося в образовании когезионных или прочных адгезионных связей в твердом состоянии. При температурах $< 0.3 \dots 0.4$ от температуры плавления (в зависимости от чистоты металла и его положения в периодической системе элементов) для проявления схватывания (без диффузионного) необходимо превышение энергетического барьера, преодолеваемого в результате активации кристаллической решётки металла. При трении она осуществляется в результате совместного пластического деформирования поверхностных слоёв материала;

- на воздухе мощным фактором, препятствующим проявлению схватывания является кислород. Оксидные пленки, наиболее активно образующиеся при высоких температурах, надежно защищают металлы от схватывания. Лишь благородные металлы (золото, платина и отчасти серебро и палладий) практически не вступают в химическое взаимодействие с кислородом;

- способность металлов к схватыванию зависит от их кристаллической структуры. Наиболее склонны к схватыванию металлы с гранцентрированной кубической кристаллической решёткой – никель, аустенит железа, кобальт при температурах $> 440^{\circ}\text{C}$, платина, золото, серебро, медь, алюминий. Менее подвержены схватыванию металлы с гексагональной плотной решёткой, в которой при пластической деформации

и трении скольжение происходит лишь по плоскостям базиса (кобальт, рений, осмий);

- антифрикционные характеристики и противозадирные свойства металлов могут быть улучшены их легированием.

Снижение механических свойств и образование прочных когезионных связей в результате термической активации происходит при более высоких относительных температурах, поскольку температуры начала рекристаллизации сплавов могут быть существенно выше, чем для чистых металлов. При легировании металлов могут образовываться фазы с меньшей способностью к схватыванию (карбиды и другие металлоподобные соединения, графит, оксиды);

- металлы, используемые в качестве смазок в твердых сплавах (Co, Ni, Re, Mo), образуют «мягкие» оксиды, предотвращающие схватывание и снижающие коэффициент трения и износ металлов.

Структурно-деформационные изменения в материале при схватывании и заедании имеют свои особенности, однако определяющим механизмом их возникновения является локальная деформация, имеющая такие признаки, как оттеснение металла, текстурирование.

Повышение микротвердости в задирах вне зависимости от твердости исходного материала достигает 3 ГПа.

Схватывание и заедание возникают, как правило, при соударении с проскальзыванием.

Сдвиговая деформация материала локализована в основном в тонких (несколько микрометров) поверхностных слоях, поскольку при высоких скоростях деформации происходит запаздывание в её распространении вглубь материала.

При этом сдвиговая деформация под действием тангенциальных сил является стесненной и не приводит к разрушению, связанному с нарушением сплошности материала, она лишь искажает кристаллическую решетку и упрочняет материал.

Возникающий при заедании нагрев локальных объемов металла облегчает пластическое деформирование и релаксацию структурных напряжений, чем снижает эффект деформационного упрочнения материала.

Проблема схватывания на наш взгляд является чисто металлургической, и применение противозадирных смазок, присадок снижает развитие необходимых условий схватывания, но не может его предотвратить.

Наиболее эффективными методами борьбы с явлением схватывания следует считать те, которые предельно снижают свободную энергию поверхности и предупреждают ее увеличение.

Надежность работы машин, помимо прочих факторов, определяется интенсивностью изнашивания их трибосопряжений, которая в свою очередь зависит от качества применяемых смазочных масел. В процессе эксплуатации в маслах накапливаются механические примеси (частицы износа, пыль, продукты окисления масла), которые могут привести к абразивному изнашиванию трибосопряжений и снизить, таким образом, надежность машин. Экспериментально

установлено, что уменьшение с помощью искусственного диспергирования размеров частиц до 5 мкм и менее, а, следовательно, увеличение их количества при неизменной массе, приводит к снижению интенсивности изнашивания трибосопряжений. Механизм этого явления с теоретических позиций может быть установлен с привлечением аппарата термодинамики.

Высокие нагрузки (температуры) приводят к схватыванию и задиру контактирующих поверхностей. Предотвращение задира при таких режимах трения зависит в основном от химических процессов, протекающих на поверхности его тонкого слоя. Высокие температуры (на пятнах контакта могут превышать 1000°C) ускоряют химические реакции с металлом серо-, хлор и фосфоросодержащих присадок и продуктов их превращений, присутствующих и накапливающихся в смазочном материале. При этом на поверхности металла образуются пленки, содержащие сульфиды, хлориды и фосфиды, а также другие химические соединения, препятствующие схватыванию и задиру металлических поверхностей и обладающие низким сопротивлением срезу.

Термин «смазочное масло», к сожалению, создает трудности в понимании того факта, что современные масла выполняют много функций, не менее важных, чем снижение трения и изнашивания. Причем многие требования к маслам по своей сути антагонистичны.

Современные и перспективные смазочные масла для мобильных машин создавались и создаются с учетом ряда факторов, ставших актуальными в последние годы:

1. снижение металлоемкости машин, формирование режимов их работы и энергонасыщенности, сопровождающиеся ужесточением режимов работы трущихся сопряжений, увеличением тепловых и механических нагрузок на смазочные масла;

2. снижение энергопотребления и расхода топлива, а также трудозатрат на техническое обслуживание и ремонт машин повлекли за собой необходимость создания энергосберегающих масел с длительным сроком службы;

3. повышение требований к экологичности машин, привело к более жесткому нормированию токсичности отработанных газов, установлению сажевых фильтров и нейтрализаторов в выхлопных системах двигателей.

М. М. Тененбаум различает следующие виды разрушения поверхностного слоя деталей при их изнашивании: разрушение материала путем среза, путем отрыва, усталостное разрушение материал и полидеформационный процесс разрушения материала. Он считает, что разрушению поверхностного слоя предшествуют процессы разупрочнения, которые подразделяются на механические тепловые, химические и адсорбционные.

М. М. Тененбаум предлагает классификацию процессов изнашивания в соответствии с 16 видами фрикционных контактов (рис. 4.2)

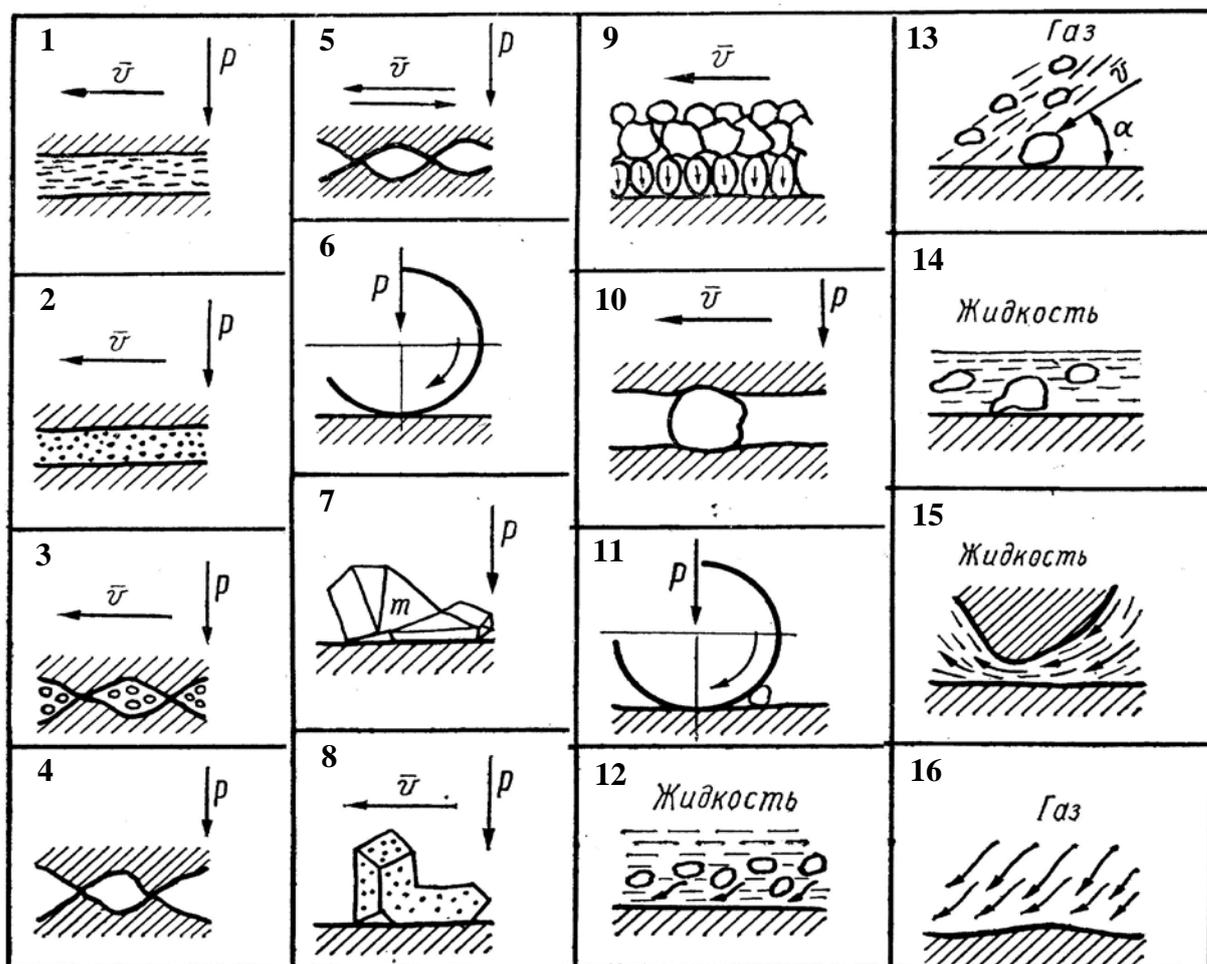


Рис.4.2. Классификация процессов изнашивания по М. М. Тененбауму.

- 1- в условиях гидродинамического или гидростатического поддерживающего эффекта жидкой смазки;
- 2 - в условиях газовой смазки;
- 3 - в условиях граничной смазки;
- 4 - при сухом трении (спорадическое схватывание, заедание, окислительный износ);
- 5 - при сухом трении или граничной смазке в условиях осциллирующего движения сопряженных деталей (фреттинг-коррозия);
- 6 - в условиях циклического действия контактных напряжений при трении качения (питтинг, осповидный износ, полидеформационный процесс разрушения);
- 7 - в условиях соударения тел (усталостный или полидеформационный процессы изнашивания, изнашивание при крупном разрушении поверхностного слоя);
- 8 - при трении о монолитный абразив (закрепленный абразив);
- 9 - при перемещении деталей в абразивной массе;
- 10 - при трении скольжения сопряженных поверхностей и наличии между ними абразивных частиц;
- 11- при трении качения и наличии абразивных частиц;

12 - в результате механического действия твердых частиц, перемещаемых потоком жидкости (гидроабразивный вид изнашивания, коррозионно-механический процесс изнашивания);

13 - в результате механического действия твердых частиц, перемещаемых потоком газа (газоабразивная эрозия);

14 - в условиях циклического действия локальных гидравлических ударов (кавитационный вид изнашивания, кавитационная эрозия);

15 - под действием высокоскоростного потока жидкости (щелевая эрозия);

16 - под действием высокоскоростного потока газа (газовая эрозия).

Характеристики структурных составляющих стали и чугуна и их влияние на износостойкость

Структурная составляющая	Характеристика	Влияние на износостойкость
Феррит	Твердый раствор углерода в α - железе	При наличии ферритной основы стали и чугуны имеют малую твердость и невысокую износостойкость
Аустенит	Твердый раствор углерода γ - железе	Отличается склонностью к упрочнению при пластической деформации, поэтому несмотря на невысокую твердость обладает хорошей износостойкостью, особенно в условиях удара и пластического контакта
Карбиды	Химические соединения железа с углеродом — цементит (6,67 % C), при легировании — хим. соед. железа с углеродом и легирующими элементами — сложные карбиды	Входя в состав перлитов, карбиды повышают износостойкость сталей и чугунов
Перлит	Ферритно-цементационная смесь (типы перлита: зернистый, пластинчатый, сорбит, троостит)	С увеличением содержания перлита до 30% износостойкость возрастает, в дальнейшем почти не меняется. Наиболее износостойки структуры с пластинчатым перлитом
Мартенсит	Перенасыщенный твердый раствор углерода в α - железе (структура закалки)	Имеет высокую прочность и твердость, обладает высокой износостойкостью
Графит	Кристаллическая модификация углерода (типы: пластинчатый, хлопьевидный, шаровидный)	Включения графита (особенно шаровидного) действуют как смазка, уменьшают коэффициент трения, повышают износостойкость

Существует несколько подходов к объяснению причин возникновения колебаний в системе трения.

Все они связывают развитие колебаний с изменением коэффициента трения в процессе фрикционного взаимодействия.

Один из подходов объясняет возникновение колебаний падающей нелинейной зависимостью коэффициента трения от скорости скольжения. В другой модели сила трения считается независимой от скорости и предполагается, что фрикционные автоколебания развиваются вследствие положительной разности между силой трения покоя и силой трения скольжения.

Третий подход предлагает учитывать как положительную разность между силами трения покоя и скольжения, так и изменение силы трения с изменением скорости. Авторами этих подходов являются известные ученые в области трибологии: А.В. Чичинадзе (1995), И.В. Крагельский (1968), Б.В. Дерягин (1960). Значительную роль в возникновении фрикционных автоколебаний играют реологические явления на контакте, а процесс возникновения автоколебаний связан с изменением характеристик трения за счет тепловых процессов. В цикле колебаний разогрев поверхностей трения на этапе относительного скольжения приводит к уменьшению коэффициента трения, а на этапе относительного покоя поверхность охлаждается и коэффициент трения возрастает. На микроуровне изменение силы трения происходит вследствие явления, которое в литературе называют «stick-slip motion» - циклы прилипания-проскальзывания. В этом случае относительное движение двух поверхностей происходит не непрерывно, а состоит из последовательных циклов прилипания-проскальзывания, что связано с зависимостью коэффициента трения от скорости скольжения.

Моделирование трения с покрытием из идеально пластического материала показало, что независимо от толщины покрытия пластический сдвиг имеет место только в самой верхней паре элементов из всего набора слоев, имеющих различные физико-механические свойства.

На основании вышеизложенного можно сделать следующее заключение:

- Основной причиной колебаний в реальных парах трения является пластический сдвиг поверхностного слоя в пятнах касания.

- Температурный режим в поверхностном слое является ведущим фактором, определяющим поведение трибосистемы.

- Пластичный неупрочняющийся слой пары трения выступает в качестве твердой смазки и интенсивно снижает фрикционный нагрев.

Вследствие волнистости контактных поверхностей температура и давление на контурной площади значительно превышают свои номинальные значения, что приводит к термоупругому формоизменению поверхностей. Поэтому при рассмотрении задач моделирования теплового состояния фрикционного контакта необходима их термоупругая постановка.

Вопросы по теме:

1. Классификация видов нарушения фрикционной связи (по Крагельскому)
2. Как происходит разрушение материала при упругом оттеснении?
3. Когда возникает когезионный отрыв?
4. Классификация процессов износа по Бринеллю.
5. Классификация процессов изнашивания по Тененбауму М.М.
6. Что предусматривает триада Крагельского при фрикционном контакте твердых тел?
7. Какие дополнения внесены А.В. Чичинадзе в триаду Крагельского?

Вопросы по самостоятельной работе:

Методика расчета ресурса подшипника скольжения с антифрикционным элементом

Литература

6. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М., Машиностроение, 1989, с. 328
7. Лебедев О.В., Кадыров С.М. Основы трибологии. Т., изд. ТАДИ, 2000, 176 с.
8. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машины. Справочник. М., Машиностроение, 1983, с. 320
9. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Под общей ред. А.В. Чичинадзе – М., Машиностроение, 2001
10. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М., Мир, -1989
11. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. –М., Наука, -2001.

5. Закономерности трения и износа композиционных материалов

Специфической особенностью работы материалов в узлах трения является повышение кинетической энергии атомов на трущихся поверхностях, разрыв межатомных связей в результате процессов упругой и пластической деформации. Рост энергетического потенциала атомов, проявляющийся в повышении температуры поверхности трения, приводит к изменению физико-механических и других характеристик, которые были свойственны материалу в исходном состоянии, и, кроме того, активизирует ряд необратимых процессов, особенно в условиях трения без смазки. При трении различные компоненты, составляющие пару трения, взаимодействуют между собой, а материал — с внешней средой. При этом в результате физических, химических, электрохимических и механических процессов образуются продукты износа, химический состав и структура которых отличны от состава и структуры исходных веществ пары трения.

Известно, что процесс трения — не только результат сцепления поверхностных неровностей контактирующих тел и следствие молекулярного взаимодействия, как это трактовали ранее. Процесс трения является динамическим. Свойства материала, его состав и структура в поверхностных слоях подвержены непрерывным изменениям, вследствие чего на рабочих поверхностях контакта могут образоваться так называемые вторичные структуры, которые влияют на износостойкость пары трения. Сопrotивление материала поверхностного слоя, его силы адгезии и механизм износа непрерывно изменяются под влиянием внешних факторов. Поэтому поведение рабочего поверхностного слоя можно охарактеризовать как некий переход из одного физического состояния в другое, соответствующее определенным условиям динамического контакта. Основная суть такого перехода определяется физико-химией поверхностных явлений и закономерностями деформации материалов.

В соответствии с изложенным, определяющим при трении является не столько исходное состояние материала, сколько структура поверхностного слоя. Таким образом, состояние рабочего слоя материала, а следовательно его работоспособность определяются процессами, протекающими при трении: окислением, которое является результатом взаимодействия рабочих поверхностей с окружающей средой; диффузионным перераспределением элементов в поверхностном слое; избирательным переносом элементов при трении; фазовыми и структурными превращениями; абсорбционным снижением прочности поверхностного слоя; распределением напряжений в рабочем слое и его износостойкостью, аморфизацией структуры поверхностного слоя

Окислительные процессы, протекающие вследствие взаимодействия поверхности трения с кислородом воздуха, способствуют образованию оксидных пленок, истирание которых приводит к окислительному износу. Отсутствие или недостаток кислорода на поверхности трения затрудняет или полностью исключает образование оксидных пленок, что приводит к

развитию процессов схватывания или аварийного износа. Роль кислорода остается значительной не только при трении в воздушной среде, но и при трении со смазкой. Так при отсутствии кислорода в газовой среде трения резко снижается смазочное действие углеводных материалов, так как смазка не содержит продуктов их окисления.

В сложных трибосистемах, таких как композиционные порошковые материалы, содержащие различного рода антифрикционные добавки, например серу или сульфиды, процессы окисления существенно усложняются. Методами электронной микроскопии установлено, что при введении в зону трения порошка серы на стальных поверхностях в начальный период трения образуется сульфид железа, ферросульфат, а при установившемся трении появляется пленка моногидрооксида $\text{FeO}(\text{OH})$ с гексагональной кристаллической решеткой, имеющая низкий коэффициент трения. Однако окисление поверхностей трения влияет положительно на трибологические свойства только до определенного уровня. Необходимо учитывать комплекс свойств оксидной пленки — прочность, хрупкость, прочность связи с поверхностью основного металла. Поэтому оксиды не всех металлов улучшают антифрикционные качества пары трения [1].

Поверхностные пленки в материале на основе фосфористого железа, содержащего медь и некоторые другие элементы, после работы в паре с чугуном СЧ 21-40 различаются составом. Белые пленки содержат большее количество чистых металлов, а темные — больше локализованных оксидов этих металлов или их смесей. При этом из порошкового материала медь переносится на поверхность чугуна и диффундирует на глубину до 20 мкм. По мере износа происходит массоперенос составляющих контртела, в частности хрома, на поверхность спеченного материала.

С современных позиций, создание высокоэффективных триботехнических материалов для экстремальных условий эксплуатации (высокие прижимные усилия и скорости скольжения, отсутствие смазки, глубокий вакуум) включает в себя следующие основные этапы. Основу материала, которая, как правило, является композиционной, выбирают исходя из соответствия комплекса её физико-механических и триботехнических свойств заданным нагрузочно-скоростным и температурным режимам работы. Наиболее часто основой триботехнических материалов служат железо, медь, титан. Для снижения потерь на трение в основу вводят твердосмазочный компонент, который образует на трущихся поверхностях экранирующие плёнки, не взаимодействуя с основой. Обычно роль твёрдой смазки играют мягкие пластичные металлы — серебро, молибден, свинец, олово, их сплавы. Снижение склонности к схватыванию и повышение несущей способности композиции достигается путем легирования основы компонентами, которые либо входят в твёрдый раствор с матричным материалом, либо образуют новую, более прочную фазу. Например, для меди такими добавками могут быть олово, никель, марганец, фосфор. Для жёстких условий работы в состав матричного материала вводят твёрдые тугоплавкие соединения, которые воспринимают при трении

значительную часть нагрузки. Наконец, для повышения прочности связи между основой и тугоплавкими включениями в состав композиции вводятся адгезионно-активные компоненты, улучшающие смачиваемость (титан, литий и другие).

Для повышения износостойкости композиции в неё вводили фосфористую медь. В процессе синтеза композиционного материала образуется эвтектика, состоящая из α -твердого раствора медь—олово и фосфида меди Cu_3P . Расплавленная эвтектика смачивает раствор легирующих элементов в меди и располагается по границам зерен в виде "разорванной сетки" (рис.5.1). Эта фаза при трении препятствует интенсивной пластической деформации поверхностного слоя, снижает при этом температуру в зоне трения и устраняет схватывание. При таком расположении эвтектики материал упрочнён, однако не теряет пластичности и обладает возможностью равномерно распределять энергетическую нагрузку, возникшую к узлу трения при больших скоростях вращения. Сохранение пластичности позволяет материалу адаптироваться к этим условиям работы без разрушения.

Основа композиционного материала, имеющая микрогетерогенную структуру, приобретает необходимые триботехнические характеристики при введении в нее дисульфида молибдена и серы. В процессе синтеза материала сера взаимодействует с медью, образуя сульфиды. Слоистые соединения — дисульфид молибдена и сульфиды меди — выполняют функции твёрдых смазок и образуют при трении смазочную плёнку на рабочей поверхности, препятствующую схватыванию).

При соблюдении описанных морфологических принципов композиционного материала и их оптимизированном технологическом обеспечении достигаются следующие эксплуатационные характеристики триботехнической пары (контртело — сталь 45): коэффициент трения 0,5—0,10, интенсивность изнашивания 0,003—0,008 мкм/км при давлении 0,1 МПа и скорости скольжения 1,2-2,0 м/с. При скорости вращения 1,2—2,0 м/с долговечность подшипников достигла 480 —1520 ч .

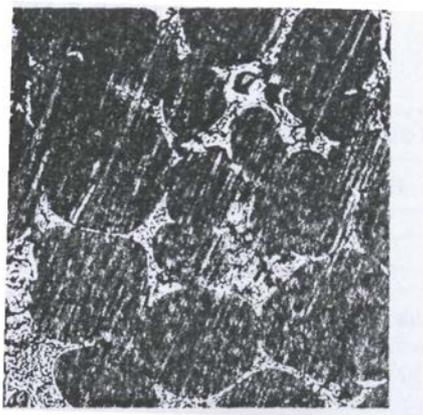


Рис 5.1 Распределение эвтектики в виде "разорванной сетки" по границам зерен в структуре композиционного материала на основе меди (x400)

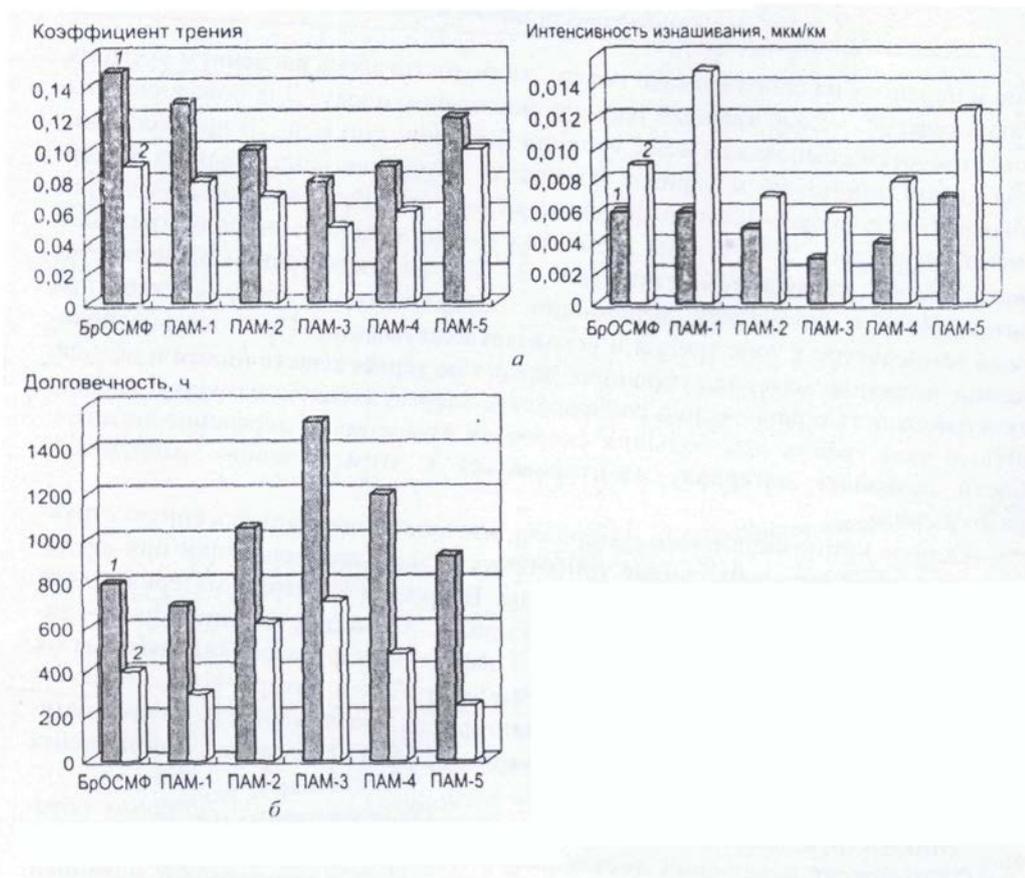


Рис. 5.2 Триботехнические характеристики композиционных материалов на медной основе при различных скоростях скольжения:
а — испытания на воздухе по схеме вал— вкладыш на машине трения; *б* — испытания в составе микроэлектродвигателя ЭД-6; $v = 1.2$ (1) и $2,0$ м/с (2)

Образцы материала ИПМ-304 при пятикратном повышении скорости скольжения (от $0,2$ до $1,0$ м/с) показали значительное снижение как коэффициента трения, так и износа, а при пятикратном увеличении нагрузки (с 2 до 10 Н) — практически неизменные минимальные значения и коэффициента трения, и износа (рис. 5.2)

При испытаниях образцов материала ИПМ-304 на воздухе триботехнические характеристики резко ухудшаются (рис. 5.3). Повышение коэффициента трения и его колебания, а также увеличение износа образцов являются следствием ухудшения самосмазывания. В результате окисления свинца продукты износа содержат значительное количество его оксида, который уступает чистому металлу как по смазочному действию, так и по адгезионным свойствам.

Из рис. 5.4 следует, что средние значения коэффициента трения составляют $0,13$ (при нормальной температуре). Разброс значений в период установившегося трения невелик — от $0,13$ до $0,15$.

Фрикционное взаимодействие указанной пары трения на воздухе характеризуется нестабильным и более высоким коэффициентом трения; среднее значение колеблется от $0,13$ до $0,28$

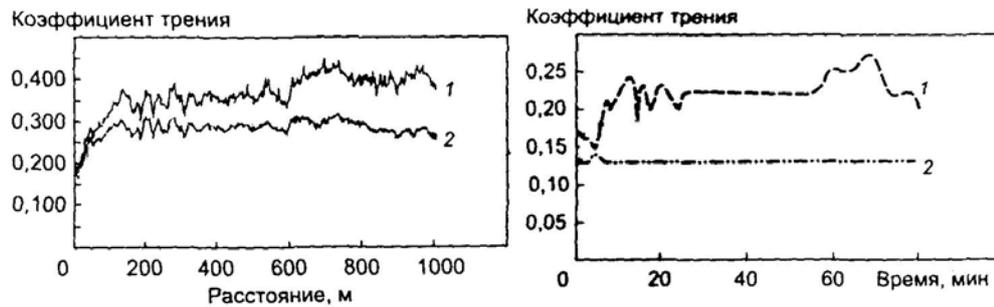


Рис. 5.3 Изменение коэффициента трения образцов материала ИПМ-304. в зависимости от пути пробега на воздухе: 1- температура 80⁰С; 2 – температура 20⁰С.

Рис. 5.4 Влияние температуры окружающей среды на изменение среднего значения коэффициента трения материала ИПМ-305 в паре с контртелом из стали ШХ15: 1- температура 80⁰С; 2 – температура 20⁰С.

Экспериментальные исследования процесса трения, проведенные в течение 10 час. показали следующие значения концентрации комплекса меди, скорости изнашивания и коэффициента трения (рис. 5.5).

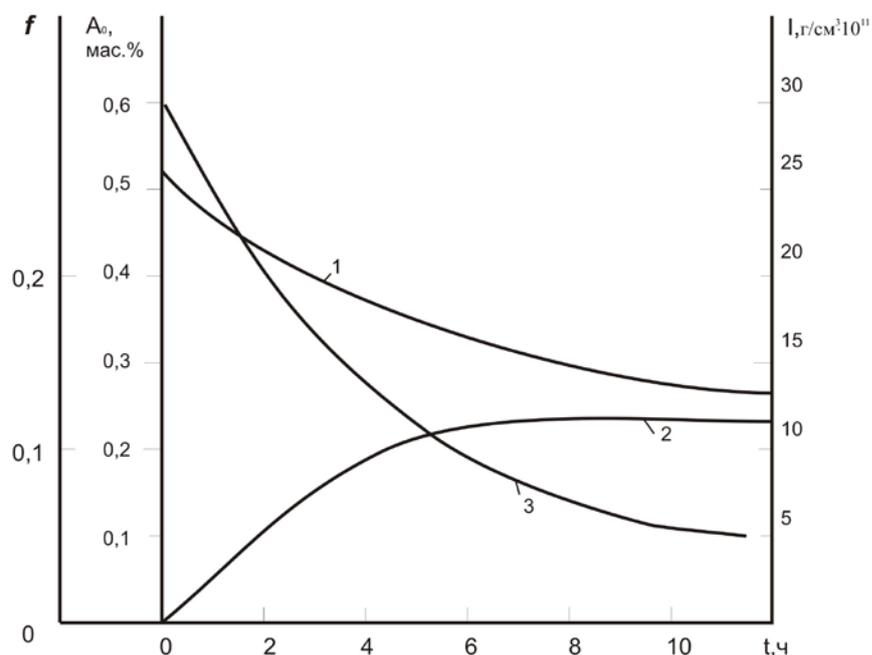


Рис. 5.5 Изменение в процессе трения концентрации комплекса меди (1), скорости изнашивания (2) и коэффициента трения (3)

Вопросы по теме:

1. Какова специфическая особенность работы материалов в узлах трения?
2. Роль структуры поверхностного слоя.
3. Как снижают склонность к схватыванию?
4. Какова основа триботехнических материалов.
5. Влияние меди, дисульфида молибдена и серы на триботехнические характеристики?

Вопросы по самостоятельной работе:

1. Дать методику определения ресурса подшипника скольжения.

Литература

1. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы –К., Наука думка, 1980 -404 с.

6. Смазывание деталей машин.

6.1. Требования к смазочным системам транспортных машин

Смазочные системы должны обеспечивать следующие требования обеспечения успешного функционирования узла трения:

надежный подвод масла на всех режимах работы двигателей ко всем трущимся деталям, охлаждаемым маслом поверхностям и устройствам, в которых масло используется в качестве рабочего тела (серводвигатели реверсирующих устройств двигателей, нагнетателей и регуляторов, гидравлические муфты приводов вентиляторов систем охлаждения и др.);

работу двигателей и их агрегатов в различных условиях окружающей среды и на всех эксплуатационных режимах;

заданную длительность работы двигателя без остановок для заправки маслом, регулировки и устранения недостатков в смазочной системе, очистки от отложений примесей, шлама и нагара на поверхностях деталей двигателей и их агрегатов;

длительную работу масла и малый его расход.

Кроме того, они должны быть компактными, простыми и нетрудоемкими в обслуживании, иметь невысокую стоимость.

Исходя из условий работы двигателей, их типов и назначения степень удовлетворения этим требованиям может быть различной, что определяет сложность, стоимость, компактность смазочных систем и их элементов. Следует отметить четкую тенденцию конструктивного усложнения смазочных систем на всех типах двигателей не только вследствие расширения функций масла в силовых установках, но и для повышения надежности работы элементов двигателей, автоматизации обслуживания, повышения срока службы масла, снижения его расхода.

Основной характеристикой смазочной системы является циркуляционный расход масла в единицу времени G_M . Эту характеристику назначают по количеству теплоты Q_M , которое масло должно переносить как хладагент.

Количество масла, прокачиваемого через систему в единицу времени, кг/ч,

$$G_M = \xi N_e q / (\Delta T c_M), \quad (6.1.)$$

где ξ - коэффициент запаса масла, необходимого на случай перегрузки и форсирования двигателя, нарушения герметичности соединений системы, увеличения зазоров при изнашивании, $\xi = 1,5 \div 3,5$; N_e - номинальная эффективная мощность двигателя, кВт; ΔT - перепад температуры масла на выходе из двигателя и на входе в него, для судовых и тепловозных двигателей $\Delta T = 5 \div 15$ °С; для автомобильных и тракторных с водомасляными охладителями $\Delta T = 20 \div 25$ °С и для тех же двигателей с воздухомасляными охладителями $\Delta T = 5 \div 8$ °С; c_M - теплоемкость масла, принимаемая равной 1,68-2,10 кДж/(кг·К).

Ниже приведены удельные количества масла, прокачиваемого через системы, л/(кВт·ч):

Двигатели без охлаждения поршней маслом:

<i>бензиновые и газовые</i>	13,6 - 52
<i>тихоходные дизели</i>	6,8 - 18,6
<i>быстроходные форсированные дизели</i>	16,3 - 65
<i>дизели с охлаждением поршней маслом</i>	27,2 - 68

Так как масло обладает большей вязкостью, а системы маслопроводов сильно разветвлены и оказывают большое сопротивление, то для прокачивания требуемого количества масла необходимо создание большого избыточного давления, которое для различных двигателей имеет следующие значения, МПа:

<i>быстроходные</i>	0,2 - 0,5
<i>быстроходные форсированные</i>	0,6 - 1,5
<i>тихоходные</i>	0,08 - 0,18

Объем масла в смазочной системе для уменьшения массы двигателя должен быть по возможности малым, но достаточным для заполнения всей системы, смачивания деталей и стенок картера и создания определенного запаса, компенсирующего расход масла между заправками двигателя. Этот расход для двигателей различных типов в зависимости от их износа составляет 0,2 - 3 % расхода топлива.

Ниже приведен удельный объем масла, л/кВт, заливаемого в смазочную систему с мокрым картером, для различных двигателей:

<i>автомобильные бензиновые</i>	0,03 - 0,15
<i>быстроходные дизели</i>	0,07 - 0,21

Маслобак заполняют на 70-75 %, поскольку всегда имеет место выделения пара.

Второе требование к маслосистеме состоит в определении и обеспечении нужного давления масла на входе в узлы трения, разработке устройств для его отбора на выходе из узлов трения, определении общей мощности насосов, фильтров, предохранительных и отводных клапанов.

Рабочий процесс в маслосистеме обеспечивают масляные насосы различных типов: шестеренные, винтовые или плунжерные. Наибольшее распространение имеют шестеренные насосы.

Винтовые насосы имеют более высокий КПД и в них отсутствует пульсация давления. Они способны создавать давление до 2,5 МПа при частоте вращения до 6000 об/мин.

Плунжерные насосы применяют, когда требуется давление 6 - 10 МПа при небольших расходах.

При изнашивании шестерен, винтов или плунжеров уменьшается производительность насосов.

6.2. Выбор смазочных материалов

Выбор СМ производится для вновь проектируемых машин, для машин после их модернизации и для действующего оборудования при изменении условий эксплуатации. Выбор зависит от многих условий,

основными из которых являются: конструкция узла трения, рабочий режим (нагрузка, скорость, температура), особенности рабочего и технологического процесса, внешняя среда (температура воздуха, его влажность, запыленность, наличие агрессивных газов и т. п.), квалификация обслуживающего персонала и удобство обслуживания механизма, требования надежности и экономические факторы.

Преимущества смазочных масел по сравнению с пластичными СМ следующие: более высокая стабильность и чистота; более низкий коэффициент внутреннего трения; лучшая работоспособность при высоких скоростях скольжения, при повышенных и при низких температурах; возможность фильтрации; возможность контроля за состоянием масла и его подачи; простота добавки и смены масла; возможность сбора отработанного масла и его регенерации. Особенно важным преимуществом является охлаждающее действие масел.

Недостатки смазочных масел: повышенные утечки через неплотности в разъемах корпусов и соединений маслопроводов; необходимость применения сложных уплотнений; повышенная пожароопасность.

Преимущества пластичных СМ: хорошая работоспособность при малых скоростях скольжения и высоких давлениях, при действии ударных и знакопеременных нагрузок, при частых остановках, а у специальных СМ — и при высоких температурах; возможность работы сопряжений при больших зазорах; хорошее удерживание в корпусах; хорошее заполнение зазоров в узлах трения и неплотностей корпусов подшипников, что препятствует загрязнению поверхностей трения.

Однако в пластичных СМ возможно их расслоение, расплавление и вытекание при длительной работе в условиях повышенных температур. Смена СМ требует таких трудоемких процессов, как разборка и промывка механизмов. Конструктивные возможности при решении задач подвода пластичного СМ более ограничены.

Вопрос о выборе СМ при конструировании смазочной системы одной или нескольких одностипных кинематических пар решается относительно просто.

Пластичные СМ применяют в парах скольжения тихоходных механизмов, в открытых зубчатых передачах и подшипниках качения, а также там, где можно избежать усложнения конструкции узла, связанного с использованием жидкого СМ. Однако при высоких скоростях скольжения или частотах вращения при использовании пластичного СМ. возникают большие потери на трение, что повышает температуру СМ. Кроме того, при высоких частотах вращения происходит отбрасывание СМ от рабочих поверхностей. Внутреннее трение повышается также при низких температурах; это может вызвать заклинивание и нарушение нормального функционирования узла. Пластичные СМ при использовании в приборах и механизмах управления могут не удовлетворять требованиям их чувствительности. Применение этих СМ не всегда возможно в узлах, не

допускающих разборки и рассчитанных на длительную эксплуатацию. Все эти обстоятельства ограничивают область применения пластичных СМ.

Малые потери на трение при смазывании маловязкими жидкостями повышают КПД механизма, а также снижают температуру нагрева деталей, что иногда существенно, как, например, в станках для отделочных операций. Так, подшипники скольжения шпинделей шлифовальных станков смазывают смесью минерального масла с керосином или даже чистым керосином.

Критериями выбора СМ и способа смазывания для подшипников качения являются: 1) значение наибольшего контактного напряжения, как характеристика нагрузки, и 2) параметр dn (d — диаметр вала, мм; n — частота вращения, об/мин), как показатель быстроходности. С увеличением нагрузки и рабочей скорости СМ приобретает значение для теплоотвода. Вязкость СМ, применяемого для смазывания подшипников, должна соответствовать нагрузке: чем меньше нагрузка, тем меньше должна быть вязкость для максимального снижения потерь на трение и предупреждения чрезмерного нагрева подшипника. С увеличением скорости вязкость СМ должна снижаться. С учетом температурного фактора вязкость должна выбираться такой, чтобы при эксплуатационной температуре рабочая вязкость СМ не оказалась недостаточной.

Применение масел с противозадирными присадками для подшипников качения нецелесообразно, так как при наличии сепараторов из медных сплавов такие масла вызывают коррозию и, кроме того, некоторые присадки стимулируют изнашивание и выкрашивание рабочих поверхностей тел качения и колец.

Измерения шероховатости поверхности образцов до и после трения позволили установить, что средняя высота микронеровностей изменяется в зависимости от концентрации жидких кристаллов в смазочном материале (рис. 6.1).

Низкое трение реализуется лишь при достижении определенных для каждого состава смазочного материала значений параметра шероховатости.

По-видимому, низкое трение при определенном микрорельефе поверхностей обеспечивается образованием смазочной пленки, исключаяющей контактирование неровности, так как сдвиг реализуется в самой пленке.

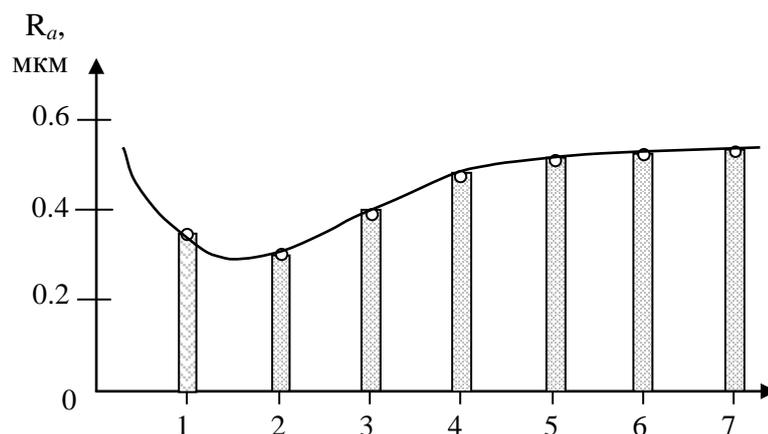


Рис. 6.1 Влияние состава смазочной композиции на параметр шероховатости поверхности вкладыша:
1 – вазелиновое масло; 2 – 0.5% жидких кристаллов;
3 – 1.0; 4 – 5; 5 – 7.5; 6 – 9.0; 7 – 100 масс % жидких кристаллов

6.3. Оценка эксплуатационных свойств смазочных материалов, работающих в условиях граничного трения

Граничное трение – широко распространенный физико-механический процесс, который связан с контактированием поверхностей в самых разнообразных своих проявлениях.

Если большинство процессов, обусловленных взаимодействием и движением элементов системы, подчиняются фундаментальным законам, на основании которых можно прогнозировать поведение рассматриваемой системы, то граничное трение вносит неопределенность, зависящую от множества факторов, связанных с закономерностями, определяемыми эмпирически.

Учесть все явные и неявные факторы с точки зрения здравого смысла невозможно. Поэтому наиболее реалистичный подход к пониманию процессов граничного трения и связанного с ним износа основан на последовательном изучении отдельных сторон данного явления, когда можно выделить основные параметры, определяющие состояние конкретной трибологической пары.

Показателем динамического характера процесса трения являются макроскопические механические колебания, возникающие во фрикционной системе при скольжении.

Так установлено, что при трении одной из причин формирования деформированного приповерхностного слоя являются механические и тепловые возбуждения, распространяющиеся вглубь среды и обусловленные переходом системы трения в автоколебательное состояние с большой амплитудой механических колебаний.

На поверхности трения и в подповерхностном слое материала будут иметь место колебания температуры, в результате чего может развиваться процесс термоциклической ползучести, а также фазовые и структурные превращения материала.

Ужесточение режимов работы современного оборудования в автотранспортном и строительно-дорожном машиностроении повышает требования к фрикционным свойствам смазочных материалов, особенно к граничным смазочным слоям (ГСС) ГСС – это полимолекулярные или мономолекулярные слои адсорбированного на поверхности вещества..

Условия формирования ГСС: нагрузочно-скоростные режимы испытаний, температура нагревания трущихся поверхностей при контакте с ней молекул углеводородов, каталитическое воздействие поверхности, химический состав материалов определяют их триботехнические свойства.

Анализ литературных данных показывает, что в области исследования граничной смазки имеется ряд проблем. Существующие лабораторные

методы исследования смазочных материалов, ориентированные на использование машин трения, не обеспечивают корреляции с результатами стендовых и эксплуатационных испытаний.

Разработанные в последнее десятилетие методы, электрофизического зондирования, на наш взгляд, могут быть применены в диагностике триботехнических свойств смазочных материалов, что позволит установить соответствие между параметрами электропроводности контакта и механической прочности фрикционных и противозадирных характеристик.

Для этой цели необходимо анализировать параметры контактного сопротивления сопряженных тел, что позволит оценивать триботехническую эффективность применяемых смазочных материалов.

В связи с широким поступлением на рынки Узбекистана смазочных материалов зарубежного производства, не отвечающими в ряде случаев требованиям для современного машиностроения, оценка их эксплуатационных свойств становится весьма актуальной.

Под эксплуатационными свойствами смазочного материала мы понимаем сохранение им во время работы в узле трения под действием нагрузочно-скоростных параметров своей смазочной способности. До 90% энергии, рассеиваемой в узле трения, расходуется на тепловыделение. Поэтому актуальны исследования температурной стойкости, фрикционных характеристик смазочных материалов в области температур 80-150°C, имеющих место в конкретных узлах трения, для определения их триботехнической эффективности.

Для проведения испытаний в режиме граничной смазки можно использовать разработанный нами вибротрибометр. Измерение контактного сопротивления по схеме шарик-плоскость осуществляется по четырехпроводной схеме при напряжении на разомкнутом контакте 50 мВ, что предотвращает пробой электрических прослоек смазочных материалов в контактном зазоре.

Верхний предел электрической схемы измерений 3 мОм.

Известно, что граничные смазочные слои некоторых смазочных материалов обладают высокими прочностными свойствами и способны выдерживать контактные давления до 0,5 ГПа, что сопоставимо с микротвердостью некоторых металлов.

В качестве подложки, на которую наносились смазочные материалы, использовалась сталь 65Г ($R_a=0,06$ мкм, $\rho=0,08-0,17$ Ом·м, $E=2,6 \cdot 10^{11}$ Па, $H_M=1,9$ ГПа), а в качестве зонда стальной шарик (ШХ-15, $HV=1,9$ МПа).

В случае «сухого» контакта окисляющихся материалов контактное сопротивление определяется собственной проводимостью оксидных пленок и сопротивлением стягивания линий тока из объема образца к пятну контакта. Снижение регистрируемых в эксперименте значений контактного сопротивления до уровня сопротивления стягивания означает разрушение ГСС. Нижняя граница туннельного сопротивления определяется исходя из минимально возможного размера поперечного сечения углеводородных молекул компонентов смазок 0,5 нм.

Критическую нагрузку перехода системы сопряженных тел от упругой к пластической деформации $N_{кр}$ можно рассчитать с учетом физико-механических свойств конкретных материалов, исходя из соотношений теории Герца:

$$N_{кр} = 17,44H_{\mu}^3 \cdot I^2 \cdot r^2, \quad (6.2).$$

где $I = (1 - \nu^2)/E$; H_{μ} - микротвердость; ν - эффективная работа выхода; r - радиус индентора.

Собственная проводимость смазочной пленки не играет решающей роли в контактной проводимости ГСС толщиной до 3 нм.

Значение контактного сопротивления в статике составляет 0,1-0,2 Ом.

Толщина ГСС при этом соответствует 0,7-0,9 нм, что свидетельствует о неразрушении мономолекулярного смазочного слоя.

Роль свойств ГСС (особенно хемосорбированных) в механизме смазывания трибосистемы при жестких нагрузочно-скоростных режимах эксплуатации, когда непосредственного химического модифицирования поверхности не происходит, становится доминирующей.

От толщины масляной пленки зависят износостойкость, контактная прочность, сопротивляемость к схватыванию материалов, силы трения и температура зоны контакта, например зубьев шестерен. Толщину масляной пленки можно определять с учетом и без учета деформации материала шестерен.

Для расчета толщины масляной пленки с учётом деформации поверхностей зубьев шестерен нами была предложена зависимость

$$h = 1,24 \cdot \left[\eta(v_1 + v_2) \right] R / \alpha^2 \Big|^{1/4}, \text{ мкм} \quad (6.3)$$

где η - вязкость масла; R - приведенная кривизна контактирующих поверхностей; v_1, v_2 - скорости качения контактирующих поверхностей; α - пьезокоэффициент вязкости.

Эта формула использовалась в экспериментальных исследованиях Иргашева А. [2] и дала хорошую сходимость.

Практически все смазываемые узлы трения периодически или постоянно работают в режиме граничной смазки. Смазочное действие граничных слоев адсорбционного происхождения определяются, прежде всего, уровнем ориентации молекул смазочной среды относительно поверхностей трения.

Повышение этого уровня обычно достигается путем введения в смазочную среду присадок, обладающих повышенной поверхностной активностью. Использование покрытий, изменяющих ориентацию молекул в граничных слоях адсорбционного происхождения также, способствуют повышению их работоспособности в достаточно широком температурном интервале.

Использование покрытий — ориентантов даёт возможность управлять смазочной способностью граничных слоев за счет оптимизации уровня ориентации частиц в поверхностном слое твердого тела путем его предварительного модифицирования.

Например, углеродные монокристаллические покрытия оказывают наибольшее ориентирующее влияние на исследуемые смазочные среды и

6.4. Эпиламы в узлах трения транспортных машин.

Термин эпилам появился в 20-х годах и определяет составы, которые наносятся на узлы трения для предотвращения вытекания масла на зоны трения и, представляют собой растворы поверхностно-активных веществ (ПАВ) в легколетучем растворителе.

При контакте твердого тела с раствором ПАВ адсорбируется на поверхности, причем ПАВ и растворитель выбираются таким образом, что обеспечивается геометропная адсорбция: полярная часть молекулы адсорбируется твердым телом, а гидрофобная часть направлена вовне. Благодаря этому высокая поверхностная энергия твердого тела заменяется на поверхностную энергию гидрофобного радикала молекулы ПАВ.

Первый российский эпилам ЭН-3 представлял собой раствор стеариновой кислоты в изооктане или четыреххлористом углероде и обеспечивал нерастекаемость часовых масел, имеющих поверхностное натяжение более 23 мДж/м^2 .

Эпилам амидофен разработан в 1980 г. для предотвращения вытекания масла из скоростных шарикоподшипников.

Механизм действия эпилама в опорах скольжения и качения имеет ряд особенностей, однако, в любом случае в области контакта трущихся поверхностей пленка эпилама быстро стирается и смазка стремится распространиться по поверхности с более высокой энергией, т.е. в зону контакта, а прилегающие участки предотвращают вытекание масла.

Эпиламирование изменяет величину поверхностной энергии. В результате этого увеличивается угол смачивания и предотвращается растекание смазки по горизонтальной поверхности. Трудно предположить, что пленка эпилама может оказывать какое-либо влияние на износостойкость материала. В условиях, когда величина износа достигает десятков и сотен микрометров, т.е. на несколько порядков превышает толщину пленки эпилама, непосредственное участие этой пленки эпилама в повышении износостойкости практически невозможно.

Таким образом, ни структурными изменениями и связанными с ними изменениями механических свойств материала, ни эффектом понижения поверхностной энергии, ни непосредственным влиянием покрытия эпилама нельзя объяснить улучшение триботехнических характеристик эпиламированных материалов. Эксперименты показывают, что влияние эпиламирования на структуру поверхностных слоев металла при трении в узлах транспортных машин состоит в уменьшении величины несовершенства кристаллической структуры по сравнению с такими же условиями трения неэпиламированных образцов.

Это можно объяснить тем, что снижение силы трения, обусловленное эпиламированием, приводит к меньшей искаженности кристаллической структуры, которая определяет повышение износостойкости эпиламированных образцов.

6.5. Модификаторы трения

Большое значение в износе вращающихся поверхностей и уменьшении коэффициента трения имеют модификаторы трения. Чтобы обеспечить небольшой коэффициент трения при малой скорости скольжения, возникла необходимость в добавлении агентов, повышающих маслянистость. Для этого применяются высшие жирные кислоты, например, олеиновая кислота, сульфированный спермацет, другие сложные эфиры, а также соединения органической фосфорной кислоты, обладающие способностью модифицировать трение (рис.6.2).

Модифицирование трения — это процесс, осуществляемый при граничной смазке. Обычно при граничном трении снижение износа и предотвращение задиров эффективно обеспечиваются противоизносными и противозадирными присадками, которые образуют на трущихся поверхностях прочные пленки из химически активных компонентов присадки и металла.

Пленки, образуемые модификаторами трения, состоят из упорядоченных плотно упакованных полимолекулярных множественных рядов «пружинок», легко сдвигающихся относительно друг друга. Наружные слои пленок характеризуются малым сопротивлением сдвигу, что обеспечивает низкий коэффициент трения. Такой механизм действия модификаторов трения является, очевидно, основной отличительной особенностью по сравнению с антифрикционными присадками первого поколения.

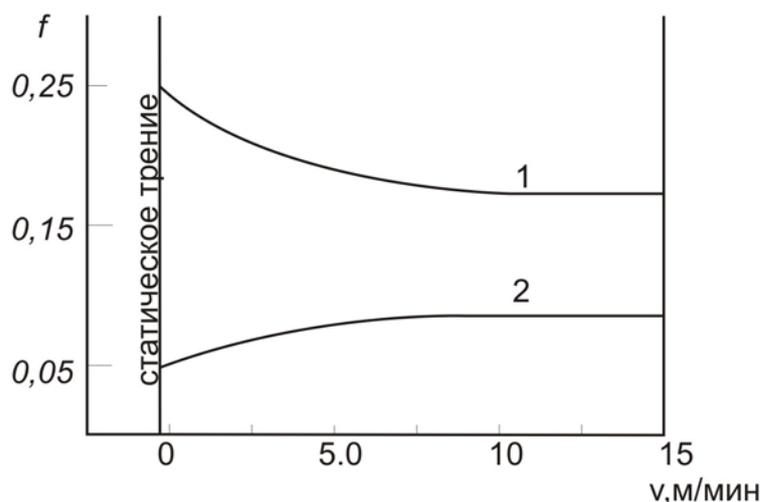


Рис. 6.2. Работа модификаторов трения:

1—перед добавлением модификатора; 2—после добавления

Маслорастворимые присадки, содержащие в своем составе серу, фосфор, молибден и т. д. и образующие соединения с металлом на поверхности трения, работают по обычному механизму противоизносных присадок, и, несмотря на то, что некоторые из них обеспечивают эффективное антифрикционное действие, называться исключительно модификаторами трения не могут.

В настоящее время в качестве модификаторов трения используются различные химические соединения, в том числе карбоновые кислоты с

длинными цепями или их производные, включая соли; производные фосфорной и фосфоновой кислот с длинными цепями; замещенные нитрилы; комплексы, содержащие молибден, и другие соединения с гетероатомами или полярными группами, обеспечивающими хорошую адсорбцию молекул на поверхности металла. По элементному составу предлагается использовать фосфор-, серо-, бор- и металлосодержащие соединения.

Некоторые химические соединения, используемые в качестве антифрикционных присадок, способны одновременно снижать износ трущихся поверхностей. Состав поверхностного модифицированного слоя зависит не только от состава соединения, но и от его химического строения. В настоящее время среди применяемых сортов масел много таких, в которых содержится около 1% золы в расчете на сернистый остаток. Однако даже такие масла не предупреждают износ.

Физико-химический принцип механизма действия модификаторов трения заключается в ориентации на поверхности металла молекул присадки с очень высокой адсорбционной способностью.

Эффективность модификаторов можно повысить введением добавок, упрочняющих вертикальную ориентацию молекул модификаторов без их отвердения. При чем эффективные модификаторы трения должны образовывать толстые пленки.

В качестве полярных групп в молекулах модификаторов трения используются азот, кислород, фосфор, бор и сера.

В настоящее время распространены по три типа модификаторов трения: увеличивающие маслянистость, твердый смазочный материал (двусернистый молибден, графит и др.), растворимые в масле органические соединения молибдена. Механизм их действия различный. Так, первый тип модификаторов создает защитную пленку, химически или физически адсорбируемую трущимися поверхностями. Третий тип образует в зависимости от трения продукты разложения, заполняющие участки впадин и превращающиеся в защитную пленку.

Эффект модификатора трения проявляется после разложения или адгезии, поэтому он в большой степени зависит от температуры, а также от неровностей трущихся поверхностей, но не проявляется до завершения в определенной степени первоначальной обкатки (для автомобилей около 4000 км). Кроме того, необходимо учитывать и остаточный эффект, выражающийся в том, что влияние модификатора трения сохраняется даже при замене масла с его добавлением в масло, не содержащее модификаторы.

Поскольку с уменьшением вязкости увеличивается доля, приходящаяся на смазку на границе раздела, применение модификаторов трения параллельно с уменьшением вязкости повышает экономический эффект, и наоборот, в условиях гидродинамической смазки эффект модификаторов трения не проявляется.

Сочетание модификаторов трения и снижение вязкости в отношении наиболее разработанных к настоящему времени машинных масел позволяет рассчитывать на уменьшение расхода горючего на 3—5%

6.6. Контроль эксплуатационных показателей масел.

Трибосистема в общем случае представляет собой совокупность трущихся деталей и смазочной среды. Состояние смазочного масла дает информацию не только о его работоспособности, но и отражает процессы, происходящие в трибосистеме в целом. В ходе эксплуатации механизм постоянно подвергается воздействию окружающей среды, высоких температур, скоростей и нагрузок, что приводит к изменению химических и физических свойств масла.

Работа механизма с маслом, утратившим свои рабочие свойства, приводит к образованию лакоподобных осадков, карбенов, карбоидов, асфальтенов, ухудшению состояния масла и ещё большему росту температуры и износа, что приводит к преждевременному разрушению механизма. Основными причинами ухудшения свойств масла являются изменение его химической структуры (окисление, термическая деструкция, разложение присадок) и увеличение содержания воды и механических примесей в масле (рис. 6.3)



Рис.6.3. Основные причины ухудшения свойств масла

Для характеристики состояния масла используют показатель «общая загрязненность», отражающий результат воздействия на масло указанных факторов. Общая загрязненность масла оценивается фотометрическим методом, который заключается в определении изменения оптической плотности пробы работавшего масла относительно пробы свежего масла к последующим сравнениям её с допустимым уровнем.

Окисление масла происходит при повышенных температурах в присутствии кислорода. Для оценки степени окисления масла используется стандартный метод определения общего кислотного числа.

Температурная деструкция масла обычно происходит при его контакте с горячей поверхностью в условиях ограниченного доступа кислорода или при

резком локальном увеличении температуры (до 200°C), связанным с адиабатическим сжатием пузырьков воздуха в насосах, подшипниках и др. В лабораторных условиях для оценки изменения химических свойств масла в результате окисления и термической деструкции применяется метод инфракрасной Фурье спектроскопии, который позволяет проводить оценку окисления масла по резонансному поглощению характерных групп атомов на частоте 1740 см^{-1} , а термической деструкции — на частоте $1600 \dots 1640\text{ см}^{-1}$.

Однако, этот метод трудно реализуем в оперативной диагностике в силу своей трудоемкости и сложности оборудования. Одним из наиболее ранних индикаторов окисления и термической деградации масла является изменение его цвета. Изменение цвета происходит в зависимости от образования высокомолекулярных соединений. Цвет масла — один из стандартных показателей, который указывается в его характеристике и определяется согласно ГОСТ 20284-74.

Сущность метода заключается в визуальном сравнении на колориметре цвета масла и его раствора в бензине с цветами стеклянных светофильтров. Цвет масла выражается в единицах ЦНТ, соответствующих номеру цветного стеклянного светофильтра. Чем выше степень химического разложения масла, тем в более, длинноволновую область спектра смещается его цвет.

Ухудшение эксплуатационных свойств масел происходит также при попадании в них загрязнений из окружающей среды (пыли, песка, металлических частиц и т.д.) и образовании их при эксплуатации гидросистемы (продукты коррозии, частицы износа), что является причиной изменения их физических свойств и увеличения общей загрязненности.

Присутствие в масле воды ускоряет процессы химической коррозии, разложение присадок и ухудшает его вязкостные свойства. Вода обычно попадает в гидросистему вследствие конденсации влаги из воздуха.

Для предотвращения истощения присадок и ускоренной коррозии содержание воды в масле должно быть минимальным.

В последние годы в научных центрах Японии, Германии и США наметилась тенденция определения эксплуатационных свойств масел с помощью интегральных интеллектуальных детекторов, позволяющих получать и обрабатывать информацию о состоянии масла и условиях работы пар трения в целом. Детектор состоит из интегрального датчика и электронного блока. Интегральный датчик представляет собой совокупность сенсоров, измеряющих требуемые параметры. Для этого используются сенсоры фирм Simens, Honewell Inc, Microchip Technology Inc, Thermo Nicolet, Pall Corporation и др.

Высокие информативность и уровень автоматизации детектора дают возможность постоянного контроля работоспособности масла и пар трения узлов машин и механизмов.

6.7. Перспективные смазочные материалы.

Одной из современных тенденций в машиностроении и приборостроении является внедрение новых электромеханических устройств с магнитоуправляемыми наножидкостями (МНЖ) и порошковыми смазочными

материалами (МПСМ). Развитие исследований в области магнитоуправляемых материалов началось во второй половине прошлого века и связано, в частности, с именем проф. Д. В. Орлова, тесно сотрудничавшего с И. В. Крагельским.

Магнитоуправляемая наножидкость представляет собой коллоидный раствор тонкодисперсного магнетика (диаметр около 10 нм) в жидкостиносителе. В качестве магнетика применяют магнетит, железо, никель и кобальт, а в качестве жидкостиносителя — кремнийорганические и фторорганические жидкости, минеральные и синтетические масла, эфиры, керосин, воду и другие жидкости в зависимости от назначения МНЖ. В МНЖ сочетаются свойства твердого вещества и жидкости, что открывает возможности управления при помощи магнитного поля ее ориентацией в пространстве, вязкостью, намагниченностью, триботехническими, тепловыми, оптическими и акустическими свойствами.

МПСМ представляют собой смесь порошков твердого смазочного (дисульфид молибдена, графит, полиэтилен и др.) и магнитомягкого (никель, железо, кобальт и др.) материалов. Твердые смазочные материалы, как правило, диамагнитны, однако введение в их состав некоторого количества магнитомягкого материала придает им магнитные свойства, почти не ухудшая их смазочных характеристик. Это позволяет в несколько раз повысить ресурс узлов трения в экстремальных условиях за счет многократного увеличения полезного объема смазочного материала в механизме и обеспечения непрерывной подачи его в зону сопряжения деталей трения с помощью магнитного поля.

Уникальные свойства разработанных МНЖ и МПСМ позволили создать высокоэффективные электромеханические устройства на их основе (абсолютно герметичные магнитожидкостные уплотнения валов и штоков; быстроразъемные уплотнения крышек и фланцевых соединений для вакуумной, химической и биологической технологий; пылезащитные уплотнения для прецизионного оборудования и приборов), герметичные подшипниковые узлы и зубчатые передачи с магнитоуправляемыми смазочными материалами для работы в условиях неблагоприятного воздействия среды; магнитоуправляемые муфты и тормоза для техники нового поколения; высокоточные магнитожидкостные датчики угла наклона, ускорения и малых перепадов давлений для систем автоматического регулирования и измерения; демпфирующие и виброизолирующие устройства.

Другое перспективное направление в области смазки узлов трения связано с достижением режима "суперсмазки", который характеризуется рекордно низкими значениями коэффициента трения. Фактически этот эффект представляет собой новый вариант реализации правила положительного градиента механических свойств, которое является одним из основных положений молекулярно-механической теории трения И. В. Крагельского. Условие его проявления для кристаллических тел — различная ориентация решеток на поверхностях контактирующих кристаллов. Это ориентационное несоответствие кристаллических структур достаточно велико для того, чтобы существенно ослабить межатомное взаимодействие, которое обуславливает

трение атомарно гладких поверхностей. Для изучения режима "суперсмазки" применяют современные методики измерения коэффициента трения на атомарном уровне, базирующиеся, например, на использовании атомно-силового микроскопа. С помощью такого оборудования исследователям удалось зарегистрировать очень низкие ($< 0,005$) коэффициенты трения для многих кристаллических материалов со слоистой структурой, известных как твердые смазки (графит, гексагональный нитрид бора, дихалькогениды переходных металлов и т.п.).

В последнее десятилетие прогресс в области технологий нанесения покрытий сделал возможным синтез различных видов алмазоподобных углеродных покрытий, которые уже стали объектом исследований специалистов по триботехнике. Они также демонстрируют свойства "суперсмазки", когда может быть достигнут коэффициент трения на уровне 0,001. В этом случае экстремально низкое трение объясняют очень малой поверхностной энергией покрытий, обеспечивающей крайне слабое адгезионное взаимодействие в контакте.

Вопросы по теме:

1. Что такое модификатор трения и как повысить его эффективность?
2. Как оценивают смазочные материалы, работающие в условиях граничного трения?
3. Для чего применяют эпиламы в узлах трения и каков механизм их действия?
4. Для чего очищают смазочные масла и как работают мембранные фильтры?
5. Как производится выбор смазочных материалов?

Вопросы по самостоятельной работе:

1. Изучить основные термины и определения, применяемые в триботехнике.
2. Описать понятие и механизм действия модификаторов трения и эпилам.

Литература

1. Лебедев О.В., Кадыров С.М. Основы трибологии. Учебное пособие для бакалавриата специальностей В 521300 и В 521400. Т.: изд. ТАДИ, 2000г., с. 176
2. Иргашев А. Методологические основы повышения износостойкости шестерен тихоходных тяжело нагруженных зубчатых передач агрегатов машин. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Т., 2005, 40 с.
3. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В2 т./Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978 Т.1 399 с.Т.2. 357 с.
4. Броун Э.Д., Буяновский И.А., Воронин Н.А. и др. Современная трибология. Итоги и перспективы. /Отв. Ред. К.В.Фролов. — М., изд. ЛКИ, — 2008.

7. Абразивное изнашивание

Наиболее опасный вид изнашивания – абразивный – часто возникает под воздействием пыли, инородных частиц и загрязнений попадающих в узлы трения машин из окружающей среды.

При этом виде изнашивания твердые неровности одного тела внедряются в поверхность более мягкого тела и вырывают материал более мягкой поверхности, оставляя углубление или бороздку (канавку).

Для повышения абразивной износостойкости металлов необходимо повышать твердость и пластичность.

Абразивные частицы производят на поверхностях трения разрушительное действие в двух основных формах. Острые абразивные частицы царапают, совершают хаотический процесс микрорезания, что наблюдается, например, при работе транспортных или горных машин.

Второй характерный механизм изнашивания - деформационное действие «тупых» абразивных частиц, которые не царапают, а выдавливают лунки или бороздки и вызывают при многократном повторении локальные усталостные разрушения.

Еще одной разновидностью абразивного износа является гидроабразивный износ. Гидро- и газоабразивный износ возникает при действии на поверхность потоков газа или жидкости, содержащих частицы абразива.

Формирование частицы износа при абразивном изнашивании является сложным физическим процессом включающим внедрение абразивной частицы и ее последующие перемещение по поверхности трения.

В поверхностном слое металла вероятно формирование структуры стали, близкой к равновесному состоянию.

Износостойкость сталей при абразивном изнашивании оценивается по сопротивлению двум самостоятельным силовым воздействиям на их поверхность: пластической деформации поверхности при внедрении абразивной частицы и её последующему относительному перемещению.

Весовой износ металла образца можно представить как

$$G = G^* K_h^{-1},$$

где K_h – коэффициент внедрения абразивных частиц (для стали

$$K_h = \frac{h_3}{h} = \sqrt{\frac{HV}{HV_3}} = HV^{1/2}) \quad h = \sqrt{\frac{p}{C_1 \eta HV}} \quad h_3 = \sqrt{\frac{p}{C_1 \eta HV_3}}$$

h_3, h – глубина внедрения абразивной частицы в поверхность эталонного и исследуемого образца;

G^* - приведенный износ, мГ;

G – весовой износ металла образца, мГ;

HV – твердость исследуемого металла, $HV_3=1$;

C_1 – коэффициент формы абразивной частицы;

η - количество абразивных частиц, приходящихся на единицу поверхности, мм^{-2} .

p – давление.

Критерием сопротивления металла пластическому оттеснению на контакте является энергоемкость пластической деформации в отожженном состоянии, величина которой определяется по формуле

$$E = \sigma_b(0,84\psi + 1,61\psi^2 - 0,04\psi^3),$$

где σ_b – предел прочности металла, мПа;

ψ - относительное сужение поперечного сечения цилиндрического образца ($\psi=40-50\%$).

Для стали 45 $E_{\max}=1100\text{МДж/м}^3$ при $HV = 370$.

Максимум энергоемкости стали соответствует наибольшему значению её износостойкости в вязкой области разрушения.

При отсутствии абразивных частиц в струях жидкостей или газов наблюдается эрозионный износ.

К данной разновидности изнашивания близок кавитационный износ. Кавитационный износ возникает, когда жидкость обтекает края препятствий, например лопаток насосов, турбин. На краях препятствий резко изменяется скорость течения, образуются разрывы в кавитационные образования, заполненные паром, которые, захлопываясь создают ударные волны. Многократное ударное воздействие расшатывает кристаллы металлической поверхности, которые через некоторое время выкрашиваются. Наиболее изнашивающей способностью обладают те абразивные частицы, которые имеют повышенное значение микротвердости (табл.7.1).

Таблица 7.1.

Значения микротвердости абразивов, применяемых при определении интенсивности изнашивания пар трения.

Абразив	Микротвердость, мПа	Абразив	Микротвердость, мПа
Мрамор	1100	Гранат	14000
Известняк	1200	Корунд	18000-20000
Даломит	3250-415	Электрокорунд нормальный	20000-22000
Стекло	5000-5800	Релит	22000
Гранит	8300	Карбид кремния	29000-35000
Кремень	9370-11000	Карбид бора	40000-42500
Кварцевый песок	10000-11000		

Поэтому, чтобы управлять абразивным износом металлов в желаемом направлении, необходимо иметь определенные сведения о прочностных характеристиках и форме абразивных частиц. В решении этой проблемы имеются определенные трудности, поскольку зерна абразивных

материалов неоднородны (имеют пустоты, всевозможные инородные включения, субмикротрещины, анизотропию абразивных зерен и т.д.)

На основании исследований влияния соотношения твердости абразива ($HВ_a$) и твердости изнашиваемых материалов ($HВ_m$) на величину износа можно сделать следующие выводы:

- при $HВ_a / HВ_m \leq 0,7 \dots 1,1$ износ минимален, а износостойкость материала велика;

- при $0,7 \dots 1,1 < HВ_a / HВ_m < 1,3 \dots 1,7$ износ тем больше, чем больше величина $HВ_a / HВ_m$;

- при $HВ_a / HВ_m \geq 1,3 \dots 1,7$ относительный износ имеет конечную и постоянную величину, независимую от $HВ_a / HВ_m$.

Наиболее интенсивное изнашивание происходит при микрорезании. Интенсивность весового изнашивания в этом случае можно определять по формуле

$$I_a = bhl\gamma_m n ,$$

где b – ширина царапания ($b \approx 1,4 R$; R – объемный радиус абразивной частицы);

h – глубина внедрения;

$$h = \frac{N}{\pi R c \sigma_T} \quad N - \text{нагрузка; } c - \text{коэффициент формы абразивной частицы;}$$

σ_T – предел текучести материала;

l – путь трения абразивной частицы;

γ_m – плотность металла изнашиваемой детали;

n – количество абразивных частиц, одновременно находящихся в зазоре.

Нашими исследованиями установлено, что результаты измерений прочности абразивных зерен ближе всего могут быть аппроксимированы логарифмически нормальным законом распределения. Применение этого закона позволяет на основании ограниченной выборки сделать достоверные, удовлетворяющие практическим целям, выводы о средних значениях прочности и форме зерен и оценить их.

Определяя число и соотношение различных частиц, можно делать выводы о преобладающем механизме износа, режиме эксплуатации, состоянии смазывающей среды и ресурсе работы анализируемой пары трения.

Адекватное описание формы абразивной частицы должно включать возможность анализа контура частицы на глобальном и локальном уровнях, быть однородным в представлении, инвариантным к масштабу и положению частицы в поле зрения. Существуют различные способы решения этой задачи, среди которых наибольшее распространение получили методы, основанные на представлении контура частицы или её сигнатуры рядом Фурье.

Признаки, определенные на коэффициентах разложения в ряд Фурье, формируют полную систему параметров и обладают целым рядом

аналитических свойств, позволяющих более содержательно подходить к решению задач сравнения и классификации частиц по форме.

А. Я. Григорьевым (Белорусский институт механики и металлополимерных систем) было представлено 40 характерных разновидностей частиц износа, выделенных из проб смазочного материала гидросистемы машины.

Пробы масла пропускались через поликарбонатный фильтр с диаметром пор 3 мкм. Выделенные частицы износа подвергались промывке растворителем, после чего готовились к исследованиям на растровом электронном микроскопе по стандартной методике. Контуры исследованных частиц износа имели следующий вид (рис.7.1):

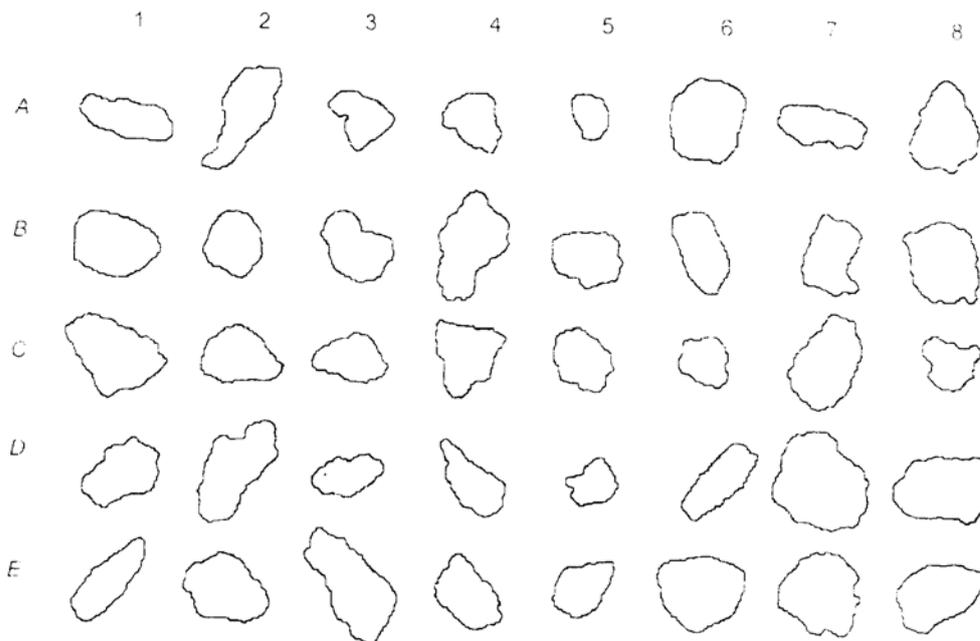


Рис.7.1. Контуры исследованных частиц износа

Для расчета контур частицы представлялся в виде зависимости радиуса частицы от длины её контура.

$$R = f(L),$$

где $L_i = \sum_{j=1}^{i-1} \sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2},$

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2},$$

и

$$x_c = \frac{M_x}{A}, \quad y_c = \frac{M_y}{A},$$

$$A = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N (y_{i+1} + y_i)(x_i - x_{i+1}),$$

$$M_x = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^N (x_{i+1}^2 + x_{i+1}x_i + x_i^2)(y_i - y_{i+1}),$$

$$M_y = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^N (y_{i+1}^2 + y_{i+1}y_i + y_i^2)(x_i - x_{i+1})$$

где x, y – координаты контура частицы износа;

N – число точек контура;

L – длина сегмента контура;

R – контурный радиус;

x_c, y_c – координаты центроида контура;

A, M_x, M_y – площадь и моменты инерции относительно осей OX и OY фигуры, ограниченной контуром.

Для устранения зависимости от масштаба величины R и h

нормировались: $r = \frac{R_i}{R_{\max}}$ и $l = \frac{L_i}{L_{\max}}$

где r, l – относительные контурный радиус и длина соответственно.

Функция $r(l)$ имеет период равный единице (рис.7.2) и его можно представить в виде ряда Фурье:

$$r(l) = r_0 + \sum_{n=1}^m [a_n \cos(2\pi n l) + b_n \sin(2\pi n l)],$$

где r_0 – средний контурный радиус;

a, b – коэффициенты разложения в ряд Фурье.

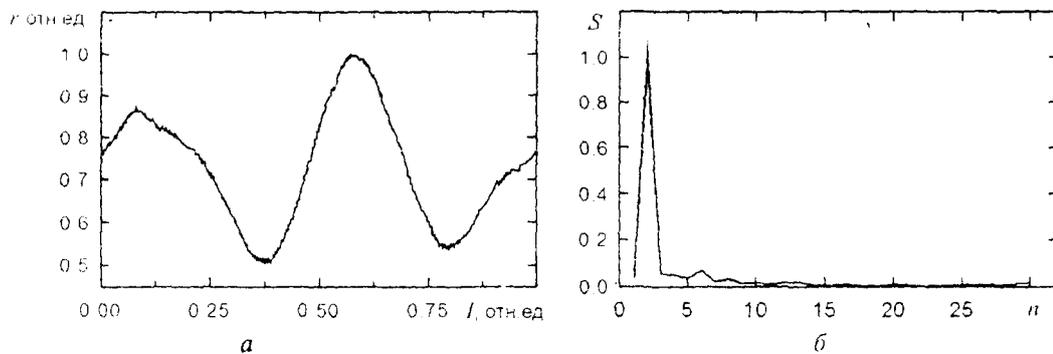


Рис.7. 2. Сигнатура (а) и спектр Фурье частицы износа А1.

Коэффициенты r_0, a_n, b_n рассчитывались по формулам:

$$r_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i,$$

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N r_i \cos(2\pi n l_i),$$

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N r_i \sin(2\pi n l_i).$$

Составляющие спектральной плотности контура

$$S_n = \frac{2}{\pi R_0} \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

инвариантны к его положению в выбранной системе координат, выбору начальной точки отсчета координат и масштабу.

Изнашивающая способность различных абразивов будет меняться, но при этом выделяется три характерных области:

\propto область, где изнашивание практически отсутствует;
 \propto область, где изнашивание увеличивается пропорционально твердости абразива;
 \propto область, где с увеличением твердости абразива изнашивание не меняется.

Независимо от схем испытаний соотношение твердости абразива и металла влияет на изнашивание практически одинаково.

Наиболее заманчивой представляется идея использования в качестве критерия абразивной износостойкости механических свойств материала.

В настоящее время чаще всего в качестве такого критерия используют показатели микротвердости.

Однако практика показала, что при выборе износостойких конструктивных материалов ориентация на твердость как на единственное средство увеличения износостойкости не всегда оправдана.

Абразивное изнашивание также характеризуется интенсивным пластическим деформированием и упрочнением поверхностных слоев пары трения, следовательно, накоплением в этих слоях скрытой энергии деформации. Когда поверхностные слои наклепываются настолько, что материал теряет способность к дальнейшей пластической деформации, т.е. величина внутренней (скрытой) энергии в деформируемых слоях достигает предельной критической величины, происходит отделение частиц износа.

В отличие от простого одноосного нагружения при растяжении, абразивное изнашивание характеризуется сложным напряженным состоянием поверхностных слоев.

Величина скорости абразивного изнашивания может быть представлена аналитическим выражением С.В.Хачатурьяна:

$$V = \frac{k \cdot D \cdot f \cdot P \cdot V}{\Delta U - \Delta U_{i0} - \Delta U_T},$$

где k - константа;

D - модуль пластичности;

f - коэффициент трения;

P - нормальная нагрузка;

K - скорость скольжения;

ΔU , ΔU_{i0} - соответственно критическая, начальная плотность внутренней энергии;

ΔU_T - плотность тепловой составляющей внутренней энергии.

С помощью модуля пластичности объясняется независимость абразивной износостойкости от наклепа и увеличение абразивной износостойкости материалов в результате электронного облучения, этим критерием можно руководствоваться при выборе существующих и создании новых материалов, назначении режима термической, радиационной и других видов обработки.

Использование модуля пластичности в качестве критерия позволяет отказаться от проведения дорогостоящих и трудоемких испытаний на

изнашивание в стадии проектирования оборудования, а значит ускорить процесс изготовления новых машин.

С помощью критерия D можно объяснить отмеченное Хрущевым М.М. и другими исследователями постоянство относительно абразивной износостойкости металлических материалов, получивших перед испытаниями разную степень наклепа. Как известно, в результате наклепа твердость материала значительно возрастает, в то время как модуль пластичности не изменяется. Между относительной износостойкостью и модулем пластичности существует достаточно высокая корреляция (0.947). Возрастание модуля пластичности приводит к увеличению абразивной износостойкости металлов.

Изнашивание сталей абразивом в подавляющем большинстве реальных трибосистем (ТС) основано на феномене механического взаимодействия абразивных частиц с металлической поверхностью, проявляющемся в разрушении металла абразивом в результате механического погружения при упругом или пластическом оттеснении.

Износостойкость (или интенсивность изнашивания), а также коэффициент трения металла при механическом изнашивании (в том числе и абразивном) определяются прочностным и деформационным факторами трибологического процесса. Под прочностным фактором (ПФ) понимаются обстоятельства процесса изнашивания, обуславливающие формирование контакта. При изнашивании сталей абразивом в условиях скольжения ПФ предопределяет профиль канавок взаимодействия абразива и металла, что дает возможность идентифицировать данный (абразивный) вид изнашивания.

Другой стороной контактного взаимодействия при механическом изнашивании является развитие деформационных процессов.

Твердость представляет собой механическую характеристику металла, которая позволяет оценивать как прочностные так и пластические свойства стали. В этой связи твердость поверхностного слоя металла оказывает влияние на трибомеханические характеристики стали посредством обоих указанных факторов.

Величина износа при механическом взаимодействии элементов ТС пропорциональна глубине внедрения частиц абразива в металлическую поверхность R_a^2 , а следовательно, квадрату линейного параметра шероховатости поверхности изнашивания h^2 , поскольку они определяют площадь сечения деформационной канавки A_r :

$$\sigma \rightarrow h^2 \rightarrow R_a^2 \rightarrow A_r$$

Это соотношение иллюстрирует влияние ПФ на износ металла. В то же время на весь материал, вытесненный из канавки при взаимодействии абразива и металла, отделяется в виде частицы износа (микростружка) в результате однократного акта взаимодействия элементов ТС, т.е. часть металла, вытесненного из канавки, будет переходить в провалы по ее сторонам, и чем выше деформационная способность металла на контакте с абразивом, тем меньше

будет при прочих равных условиях износ металла (количество металла, удаленного из зоны контакта в виде микростружки).

Следовательно, прочностной и деформационный факторы будут иметь противоположное влияние на триботехнические характеристики стали.

Показатели износостойкости стали контролируются и основным прочностным фактором трибологического процесса.

Формирование же силы трения при взаимодействии металла с абразивом обуславливается как прочностным фактором, так и деформационным фактором.

Для условий абразивного изнашивания можно сформировать основные пути создания износостойких металлических материалов и сформулировать принципы их выбора:

- в случае, если детали или узлы машин работают в условиях абразивного изнашивания, то выбор материалов следует вести по значению поверхностной энергии. Учет пределов прочности, текучести и показателя, представляющего произведение предела прочности и относительного сужения, при прочих равных условиях позволяет уточнить преимущества стали по износостойкости;

- для деталей или узлов машин, работающих в условиях абразивного изнашивания и подверженных воздействию закономерных нагрузок, выбор материалов необходимо проводить с учетом оптимального сочетания поверхностной энергии и показателей пластичности, обуславливающих значительную по величине энергоемкость вязкого разрушения.

Для деталей или узлов машин, испытывающих воздействие высоких температур, выбор износостойких материалов следует вести с учетом теплоемкости и температурной зависимости поверхностной энергии. При равной поверхностной энергии материалов абразивная износостойкость определяется устойчивостью структуры к температурному воздействию.

Полезный эффект транспортного средства прежде, всего, составляют характеристики работоспособности, надежности и безопасности. Если безопасность транспортного средства во многом определяется прочностью элементов систем, механизмов и отдельных деталей, то при их оценке в категориях надежности возрастает значение и удельный вес ресурсных характеристик, определяемых конструктивными, технологическими и эксплуатационными факторами. Среди ресурсных характеристик важнейшее значение имеет износостойкость деталей – сохранение ими размеров, формы и прочностных свойств в ходе эксплуатации.

При этом отличие транспортных машин заключается в том, что при напряженном динамическом режиме нагружения трущихся пар (ступицы колёс, амортизаторы, подвеска, детали двигателя, рулевого управления и др.) в конструкции используются относительно недорогие конструкционные материалы. Трение интенсифицирует диффузионные потоки благодаря многократному повторению тепловых и силовых воздействий при встречах микронеровностей, создающих нестационарные поля с большим градиентом температур и давлений.

В общем износе можно выделить 25% адгезионного износа, 8% поверхностной усталости, 2% коррозионного износа и, наконец, 20%

приходится на абразивный износ, хотя существует мнение, что абразивному износу может быть приписано $\approx 50\%$ всех проблем, связанных с износом.

Абразивным изнашиванием называется изнашивание при котором твердые неровности одного тела внедряются в поверхность более мягкого тела и вырывают материал более мягкой поверхности, оставляя углубление или бороздку (канавку).

Абразивное изнашивание делят на процессы с участием двух (I) и трёх (II) тел (two-and three-body abstraction). Первый процесс имеет место, когда абразив скользит вдоль поверхности (grooving abrasion), второй – когда твердая частица свободно перекачивается, и скользит между двумя поверхностями, находящимися в относительном движении (rolling abrasion). Это так называемое закрытое абразивное изнашивание, в отличие от открытого процесса, когда поток не закрепленных абразивных частиц перемещается по твердой поверхности. Считается, что процесс II может привести к износу на порядок меньше, чем процесс I, из-за того, что в первом случае незакрепленная частица собственно истирает поверхность только на 10% общего времени нахождения её в трибологической системе, остальное время она перекачивается.

Считается, что при абразивном изнашивании действуют три основных механизма: выдавливание (plowing), резание (cutting) и фрагментация (fragmentation) дробление. Объем удаленного материала считается по формуле Арчарда

$$W = k \frac{L \cdot d}{H} ,$$

где W - объем удаленного материала; k - константа, зависящая от условий изнашивания; L - нагрузка; d - путь трения; H - твердость.

Некоторые исследователи предлагали умножать значение твердости на 3, другие – использовать величину твердости со степенью $3/2$. Всё зависит от материала, поскольку материал с большей способностью к деформации будет скорее выдавливаться, чем резаться.

Современное написание формулы Арчарда уже изношенной поверхности представляется, как

$$W = k \cdot s \frac{p}{p_m} ,$$

k - константа, включающая условия контакта и формирования продуктов износа; s - путь трения; p - нагрузка; p_m - давление, вызывающее пластическое течение изнашиваемой поверхности, эквивалентное твердости.

Твердость абразива, а вернее отношение твердости изнашиваемого материала к твердости абразива – H_M/H_A называют критическим параметром. Интенсивность изнашивания уменьшается, как только твердость изношенной поверхности достигает твердости абразива, то интенсивность изнашивания быстро уменьшается.

При $0,6 < H_M/H_A < 0,8$ условия контакта способствуют возрастанию пластической деформации. При большем отношении контакт становится по существу упругим и интенсивность изнашивания уменьшается.

Способность абразивных частиц к перекатыванию также зависит от формы абразивных частиц, например, для угловых частиц более вероятно скольжение, чем перекатывание. Повышение усилия действует сдерживающее на абразивную частицу в её ориентации к изнашиваемой поверхности (своеобразная притирка), увеличивая скорость изнашивания. Форма абразивной частицы важна, потому, что она влияет на форму образующейся в материале канавки износа.

Воздействие размера абразивных частиц минимально для частиц > 100 мкм. Ниже этой величины интенсивность изнашивания быстро уменьшается с уменьшением размера частиц. Опыты показывают, что с уменьшением размера частиц преобладает скорее упругий контакт, чем пластический. Практически неизменная интенсивность изнашивания наблюдается при размерах абразива ≤ 25 мкм .

Наибольшей изнашивающей способностью будут обладать те частицы, которые имеют повышенное значение предела прочности. В решении проблемы исследования прочности абразивных частиц наблюдаются неизбежные трудности, связанные с большим разбросом результатов испытаний как из-за погрешностей установок и приборов так и из-за неоднородности зерен абразивных материалов (наличие пустот, всевозможных инородных включений субмикротрещин, анизотропии абразивных зерен , нагрев зерен и т.д.).

Кроме того интенсивный нагрев зерен способствует накоплению в них термических напряжений, снижающих стойкость зерна при трении. Влияние этого нагрева может быть определено законом теплопроводности Фурье. Уравнения теплопроводности Фурье позволяют определить, что термические напряжения в зерне, а значит и его прочность, во многом определяются теплоизоляционными свойствами внешней среды и теплопроводностью материала зерна. Например, преобладание карбида кремния в абразиве дает коэффициент теплопроводности 9,92 Вт (м. град), а для корунда – 5,25 Вт (м. град), т.е. коэффициент теплопроводности карбида кремния в 1,9 раза превышает коэффициент теплопроводности корунда, а термостойкость этих зерен соответственно равна 1775 и 1570 К.

Величина абразивного износа может быть определена выражением:

$$\delta = I \cdot \Delta L = V_{тр} \cdot t ,$$

где I- интенсивность изнашивания;

ΔL - путь трения;

$V_{тр}$ – скорость трения;

t – время трения.

Рассматривая термодинамические аспекты прочности и разрушения пар трения. В.В. Федоров (Ташкент) показал, что для оценки относительной износостойкости материалов в условиях абразивного изнашивания можно использовать теплофизические свойства материалов:

$$E = \frac{k \cdot U}{f \cdot \delta'} = k \cdot \frac{w}{f} ,$$

где k – коэффициент;

U – критическая плотность внутренней энергии (энергоемкость);

f – коэффициент трения;

δ – относительная величина скрытой энергии;

w – плотность работы трения.

Одним из основных понятий теории износа является внутренняя энергия тела, которая представляет собой сумму двух составляющих:

$$E = U_e + U_t ,$$

где U_e – потенциальная составляющая плотности внутренней энергии, являющаяся функцией координат (взаимного расположения) совокупности частиц системы;

U_t – тепловая составляющая, определяемая средней кинетической энергией поступательного, вращательного и колебательного движения частиц системы.

Сложность и нестационарность процесса, его случайный характер не позволяют пока создать общую теорию абразивного изнашивания. Однако в целях решения конкретных практических задач накоплен большой экспериментальный материал по влиянию различных факторов на износостойкость.

Анализ экспериментальных материалов дает возможность заключить, что:

- износ пропорционален нагрузке;
- износ обратно пропорционален твердости изнашиваемого материала;
- скорость износа коррелирует со скоростью скольжения.

При моделировании процессов абразивного изнашивания целесообразно делать следующие предположения:

- износ пропорционален пути трения;
- износ пропорционален работе силы трения;
- износ определяется физическими параметрами процесса и механическими свойствами материалов;
- износ пропорционален объему взаимного внедрения шероховатостей.

Методика расчетов абразивного изнашивания в общем виде состоит в том, что на компьютере последовательно выполняют следующие операции: определяют нагрузку, действующую на узел трения; определяют деформацию узла трения при действии этой нагрузки, площадь, форму пятна контакта и величину действующих контактных напряжений (для их определения используется метод объемных конечных элементов и соответствующее программное обеспечение); на каждом из элементов разбиения площади контакта определяют фактическую площадь, площадь контакта и фактическое давление изменяющегося в зависимости от режима работы узлов трения.

Границы работоспособности модели определяются расчетно-экспериментальным путем, по равенству у модели и природы значений критерия Крагельского i_h (удельный износ на пятне касания) в уравнении абразивного изнашивания

$$I_h = i_h P_a / HB$$

Соответственно из эксперимента используют значения интенсивности изнашивания I_h , удельную нагрузку на фрикционном контакте p_a , а твердость по Бринеллю материала известна по условию задачи.

Кинетический подход к моделированию изнашивания позволяет в удобной математической форме учитывать разнородные процессы различной природы (механические, химические, тепловые и др.), имеющие место при трении и разрушении поверхностей.

Абразивная износостойкость чистых металлов повышается при увеличении их твердости. Для повышения абразивной износостойкости сплавов необходимо повышать твердость и пластичность. Поверхностное пластическое деформирование, повышая твердость, усталостную прочность и износостойкость при адгезионном и окислительном изнашивании, не приводит к увеличению износостойкости при абразивном изнашивании, поскольку одновременно с упрочнением поверхностные слои металла могут приобретать хрупкость

Наиболее перспективны для защиты от абразивного изнашивания плазменные и детонационные покрытия из карбидов и твердых металлов, обладающие высокой прочностью сцепления с основой и высокой вязкостью разрушения. Перспективным для деталей, работающих в абразивной среде является их борирование на толщину слоя 0,1-0,2 мм. Абразивная износостойкость стали в результате борирования повышается независимо от фазового состава боридного покрытия и последующей термообработки.

Вопросы по теме:

1. Как определяется критерий Крагельского из уравнения абразивного изнашивания?
2. Какие абразивные частицы обладают наибольшей изнашивающей способностью?
3. Объяснить формулу Арчарда для изношенной поверхности.
4. Какие бывают абразивные частицы и как они описываются при моделировании?
5. Объяснить интенсивность абразивного изнашивания при микрорезании
6. Как повысить абразивную износостойкость?

Литература

1. Лебедев О.В., Пономарева О.М.. Анализ исследований по абразивному изнашиванию деталей транспортных машин. Материалы республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». Ташкент, ТАШИИТ, 2005, с. 277-283, том I.

2. Икрамов У.А. Расчетные методы оценки абразивного износа. М., Машиностроение, 1987, с. 288
3. Лебедев О.В., Кадыров С.М. Основы трибологии. Ташкент, изд. ТАДИ, 2000г., с. 176.
4. Львов П.Н. Основы абразивной износостойкости деталей строительных и дорожных машин. М., Стройиздат, 1970- с.71

8. Водородное, кавитационное и эрозионное изнашивание

8.1. Водородное изнашивание

Водородное изнашивание наиболее трудно поддается изучению, несмотря на то, что оно обнаруживается в узлах трения машин разных отраслей техники и по широте проявления может быть сравнимо с абразивным изнашиванием.

Водородное изнашивание зависит от концентрации водорода в поверхностных слоях трущихся деталей. Он выделяется из материалов пары трения или из окружающей среды (смазочного материала, топлива, воды и др.) и ускоряет изнашивание. Водородное изнашивание обусловлено следующими процессами, происходящими в зоне трения:

- интенсивным выделением водорода при трении в результате трибодеструкции водородсодержащих материалов, создающей источник непрерывного поступления водорода в поверхностный слой стали или чугуна;

- адсорбцией водорода на поверхностях трения;
- диффузией водорода в деформируемый слой стали, скорость которой определяется градиентами температур и напряжений, что создает эффект накопления водорода в процессе трения;

- особым видом разрушения поверхности, связанного с одновременным развитием большого числа зародышей трещин по всей зоне деформирования. Характерным для разрушения является мгновенное образование мелкодисперсного порошка материала.

Водород очень легко диффундирует под действием температурного градиента в нагретые участки тела. Это свойство используют для обезводороживания деталей после их наводороживания, например, при гальваническом хромировании. В связи с этим считали, что при трении в случае повышенных температур процесс наводороживания невозможен. Более того, полагали, что имеющийся в материале детали водород удаляется из зоны трения.

В большинстве случаев водород значительно снижает сопротивление материалов разрушению, что влечет за собой преждевременные потери ресурса работоспособности, а часто и непредвиденные аварии и катастрофы.

Происходит это вследствие водородной деградации металлов, которая характеризуется следующими тремя основными факторами: водородным охрупчиванием, водородной деградацией превращения и водородной деструкцией.

Водородное охрупчивание - это явления снижения характеристик прочности и долговечности металлов, деформируемых (нагружаемых) при наличии водорода либо поступающего из окружающей среды в процесс деформирования, либо ранее внедренного в металл, когда отсутствуют признаки химических реакций компонентов сплавов с водородом, микроструктурных изменений и повреждений, не связанных с приложением

нагрузки. Большинство сталей подвержены этому виду деградации в интервале температур 270...370 К.

Водородная деградация превращения - это явления деградации химической и физико-химической природы, т.е. это следствия либо образования в сплавах новых фаз водородосодержащих соединений, либо реализация фазовых и структурных превращений, которые становятся возможными лишь при наличии в металлах водорода. Сюда относятся такие явления, как водородная коррозия углеродистых сталей при повышенной температуре и активности водорода, а также индуцированное водородом гамма - альфа превращения в аустенитных сталях.

Эффекты этого рода водородной деградации могут активизироваться термомеханическими процессами.

Водородная деструкция - это явление образования в металлах несплошностей по причине перенасыщения их водородом (возможно локальное), которые при этом не обусловлены действием напряжений или превращениями и химическими реакциями.

Формы реализации водородной деградации металлов в конкретных ситуациях весьма разнообразны и могут стать неожиданными, что может сказываться в течение рабочих циклов в элементах под нагрузкой в виде образования и роста трещин водородного охрупчивания, а может проявиться и виде образования несплошностей и расслоения в период покоя агрегатов после вывода их из рабочего режима и устранения контакта с водородом. Оставшиеся деструкции могут затем при повторных пусках оборудования стать причиной поломок и выхода из строя машин и механизмов.

В зависимости от условий работы и конструкции узла трения, материалов трущихся пар, состава и свойств смазочной среды роль водородного фактора в общем износе при трении может быть различной. В частности, небольшое наводораживание может давать даже положительный эффект по отношению к износу за счет увеличения твердости поверхностного слоя металла.

Выделение водорода при трении из смазочной среды обусловлено трибодеструкцией среды, каталитическими, химическими и электрохимическими процессами.

При испытании на машине трения СМЦ-2 базовых масел, обладающих низким уровнем смазочных свойств и характеризующихся высоким износом, максимум температуры и химических напряжений локализуется в плоскости контакта поверхности трения, в связи с чем выделяющийся водород не диффундирует в металл, что и фиксируется методом анодного растворения. При введении в базовые масла эффективных противоизносных присадок, обладающих высоким уровнем смазочного действия и способностью образовывать прочные трибохимические пленки, максимум температуры и механических напряжений при жестких режимах трения локализуется на некоторой глубине от поверхности трения.

Создаваемый при этом градиент температуры и механических напряжений обуславливает интенсивную диффузию выделяющегося при

трении водорода в металл, причем причинами наводороживания в этом случае могут являться соединения серы, фосфора и другие элементы, содержащиеся в противоизносных присадках и выделяющиеся при трибодеструкции присадок в зоне трения.

При трении стали в смазочных маслах в зависимости от их состава может иметь место наводороживание трущихся деталей до уровня, превышающего растворимость водорода в стали в статических условиях.

Основным источником водорода является содержащаяся в масле вода, вызывающая наводороживание металла вследствие протекания при трении электрохимического процесса коррозии, выделения водорода на катодных участках поверхности и проникновения его в металл.

При трении в жестких условиях высоких нагрузок и температур источником водорода являются процессы окисления, термо- и трибодеструкции смазочного масла и его компонентов.

При трении на базовых маслах с крайне низкой противоизносной эффективностью наводороживания поверхностей после трения не обнаруживается, так как, во-первых, базовые масла содержат минимальное количество воды, во-вторых, максимум температуры и механических напряжений локализованы в плоскости контакта и выделяющийся водород не диффундирует вглубь металла, а уходит в атмосферу или остается в продуктах изнашивания.

Введение в базовые масла присадок может как ослаблять, так и стимулировать накопление водорода в поверхностном слое металла при трении.

Большинство присадок является поверхностно-активными веществами, молекулы которых более полярны, чем углеводородные молекулы базовых масел и более интенсивно взаимодействуют с водой. Наличие в базовых маслах присадок, как правило, вызывает более высокое содержание воды в объеме и, как следствие этого, более сильное наводороживание металла при трении.

8.2. Кавитационное изнашивание.

Кавитация дословно означает полость, пустота. Под кавитацией понимают явление образования в движущемся по поверхности твердого тела потоке жидкости полостей в виде пузырей, наполненных парами, воздухом или газами, растворенными в жидкости и выделившимися из нее. В движущемся с большой скоростью потоке при его сужении и наличии препятствий на его пути давление может упасть до значения, соответствующего давлению парообразования при данной температуре. При этом, в зависимости от сопротивления жидкости растягивающим усилием, может произойти разрыв, нарушение сплошности потока. Образующаяся пустота заполняется паром и газами, выделившимися из жидкости. Воздух, вовлекаемый в поток, облегчает возникновение кавитации. Образовавшиеся парогазовые пузыри, перемещаясь вместе с потоком, попадают в зоны высоких давлений. Пар конденсируется, газы растворяются и в образовавшиеся

пустоты с большим ускорением устремляются частицы жидкости и происходит сопровождаемое ударом восстановление сплошности потока.

Кавитационный пузырек может вырасти за 0,002 с до 6 мм в диаметре и полностью разрушиться за 0,001 с. При определенных типах кавитации на площади в 1 см² в течение 1 с могут образоваться и разрушиться более 30 млн. кавитационных пузырьков.

Гидродинамическая кавитация наблюдается в трубопроводах и агрегатах гидросистем. Явление кавитации вызывает вибрации, стуки и сотрясения, что приводит к расшатыванию крепежных связей, обрыву болтов, смятию резьб, фрикционной коррозии стыков, нарушению уплотнений и усталостным повреждениям.

Кавитация понижает КПД машин и вызывает непосредственное разрушение поверхностей деталей в зоне ее действия. Она способствует закоксовыванию распылителей форсунок двигателей внутреннего сгорания. Труднообтекаемая форма и неровности поверхностей, включая неровности, образовавшиеся по причине кавитационного изнашивания, служат причиной образования вихрей и отставания струй от стенок маслопроводов, что способствует возникновению или усилению кавитации.

Из нескольких миллионов образовавшихся кавитационных пузырьков примерно один из 30 тыс. участвует в разрушении. Под действием ударов поверхность металла начинает деформироваться и подвергаться наклепу; появляются линии сдвига и происходит как бы своеобразное травление с выявлением границ отдельных зерен. Многократно повторяющиеся удары вызывают разупрочнение и перенаклеп материала на отдельных микроучастках, сопровождающиеся возникновением очагов разрушения в виде трещин. Разрушается прежде всего менее прочная структурная составляющая (в сталях — феррит, в чугунах — графитовые включения). Затем может последовать выкрашивание и более прочных составляющих. Разрушение развивается в пределах зерен или по их границам в зависимости от соотношения прочности зерен и связи между ними.

Скорость кавитационного изнашивания может быть в сотни раз и более выше скорости коррозионного разрушения поверхностного слоя.

Предупредить кавитацию можно, проектируя гидромеханическую систему так, чтобы во всех точках потока давление не опускалось ниже давления парообразования.

Интенсивность кавитационного изнашивания зависит от температуры, свойств жидкости и материала деталей. Влияние вязкости незначительно. С увеличением поверхностного натяжения изнашивание происходит более интенсивно.

Кавитационная стойкость материала определяется его составом и структурой. Повышение содержания углерода в углеродистой стали увеличивает ее стойкость. Однако при содержании углерода 0,8% и более она начинает падать. Пластинчатый перлит более стоек, чем зернистый. Введение никеля и хрома в сталь повышает ее стойкость за счет снижения количества феррита, увеличения степени дисперсности и др. Шаровидная

форма графита благоприятна. Наиболее стойким является низколегированный чугу́н (1% Ni, 0,3% Mo) с шаровидным графитом.

Закалка с нагревом ТВЧ, цементация, поверхностное упрочнение, в том числе твердые наплавки, сообщают стали значительную кавитационную стойкость. То же относится к хромовому покрытию при достаточной его толщине (около 40 мкм) и сплошности. При малой толщине (менее 20 мкм) разрушение происходит под слоем хрома; существенную роль играет прочность основания. Латунь благодаря своей вязкости стойка к кавитационному изнашиванию.

8.3. Эрозионное изнашивание.

Эрозия в широком понятии — процесс поверхностного разрушения вещества под воздействием внешней среды. В машиностроении эрозия имеет более узкое понятие — разрушение поверхности материалов вследствие механического воздействия высокоскоростного потока жидкости, газа или пара. Разрушение металлов под действием электрических зарядов также относится к эрозии. Каждый вид эрозии имеет подвиды, которые являются сочетанием отдельных видов, например, газовая эрозия может быть газообразивной, газoeлектрической и т. д.

Эрозионное воздействие высокоскоростного потока жидкости, газа или пара складывается из трения сплошного потока и его ударов о поверхность. В результате трения происходит расшатывание и вымывание отдельных объемов материала. Большая роль принадлежит динамическому действию потока или струи. В зависимости от свойств материала возможны вырывы отдельных объемов или групп зерен с неблагоприятной ориентацией в отношении приложенных сил. В пластичных материалах, обладающих способностью к наклепу, вначале накапливаются микропластические деформации участков, а когда способность к упрочнению исчерпается, эти участки разрушаются, вымываются. Жидкость, внедряющаяся при ударах в образовавшиеся микротрещины, ведет себя подобно клину, раздвигая стенки трещины.

Эрозия в начальный период на гладкой поверхности развивается весьма медленно, но после появления пораженных мест усиливается. Это можно объяснить повышением хрупкости поврежденного поверхностного слоя в связи с накоплением микротрещин, расклинивающим действием жидкости и усилением ударного действия из-за большого вихреобразования у поверхности.

Разрушению от эрозии часто подвергаются рабочие (отсечные) кромки золотников гидравлических агрегатов.

Эрозионное изнашивание начинается часто с микроцарапин, возникающих при схватывании поверхностей трения. Эрозионному повреждению в данном случае сопутствует образование белого слоя.

Эрозия и коррозия весьма часто протекают совместно. Коррозионно-эрозионное изнашивание представляет собой разновидность коррозионно-механического изнашивания.

Газовая коррозия и эрозия действуют совместно, например, в выпускных клапанах высоконапряженных деталей двигателей внутреннего сгорания.

8.4. Моделирование кавитационной эрозии.

Хотя современные достижения вычислительной механики жидкостей сделали возможным повышение энергетических и кавитационных показателей создаваемых узлов трения машин, в определенных условиях избежать целиком кавитации невозможно.

В этой связи вопрос о надежном прогнозировании кавитационного износа и оптимальном подборе кавитационно-стойких материалов представляет значительный интерес для конструкторов машин.

На рис.8.1 показаны кавитационно-эрозионные кривые для различных материалов, определенные при лабораторных испытаниях на вибрационной установке (с колеблющимся образцом и кавитационной трубой)

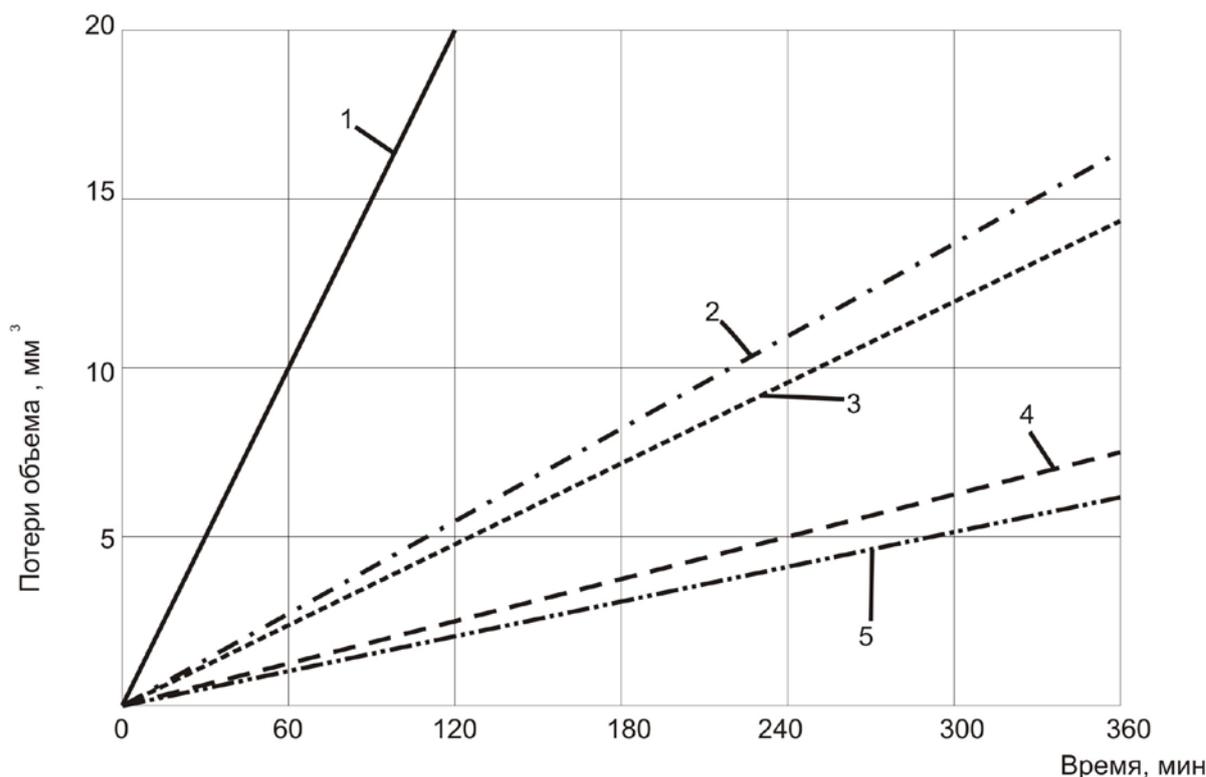


Рис 8.1. Кавитационно-эрозионные кривые полученные для следующих материалов образцов: 1- сплав алюминия: AlMg₂ 1520; 2 – технически чистое железо 04ЖР; 3 – латунь Л63; 4 – сталь конструкционная углеродистая: ст.45; 5 – коррозионно-стойкая сталь: ст.12Х1Н9Т.

Экспериментальные испытания позволили записать кривые потерь объема в виде:

$$\Delta V = A \cdot J_E \cdot U(k, t)$$

A – поверхность эрозионной зоны;

J_E – средняя плотность потока энергии, поглощаемого нагруженным материалом;

U – некоторая аналитическая функция вектора параметров кавитационной стойкости k и продолжительности кавитационной нагрузки t.

Основные положения кавитационной модели можно сформулировать следующим образом:

1. Кавитационная эрозия является стохастическим процессом, состоящим в отрыве частиц постоянного объема со случайным интервалом;

2. Мгновенная интенсивность эрозии $d(\Delta V)/dt$ пропорциональна интенсивности повреждений в смысле усталостных процессов, т.е. плотности вероятности того, что на определенном месте будет вырвана частица, если это не случилось ранее.

3. Продолжительность нагрузки, в результате которой происходит отрыв частицы материала из его поверхностного слоя, определяется случайной переменной τ с распределительной функцией

$$F(\tau) = 1 - \exp \left\{ -\alpha \left[\ln \left(\frac{\tau}{\tau_0} + 1 \right) \right]^\beta \right\}$$

где α и β - постоянные параметры.

Такое предположение означает, после удаления каждой частицы следующая может быть вырвана с плотностью вероятности, определенной уравнением:

$$\lambda(\tau) = -f(\tau) / [1 - F(\tau)] = F'(\tau) / [1 - F(\tau)].$$

Тогда поведение эрозии во времени определится функцией

$$\Delta V = \Delta V_0 \left[\ln \left(\frac{t}{\tau_0} + 1 \right) \right]^\beta,$$

где V_0 - некоторый характеристичный объем, зависящий от поля рассматриваемой поверхности и кавитационной нагрузки.

Учитывая модель Ситника Л.[4] можно записать следующее уравнение:

$$\frac{d(\Delta V)}{dt} = A \sum_{i=1}^N E_{Mi} \frac{\beta_i V_{0i}}{E_{0i}} \left\langle \frac{\Delta V}{V_{0i}} \right\rangle^{1/\beta_i - 1} \exp \left[\left\langle \frac{\Delta V}{V_{0i}} \right\rangle^{1/\beta_i} \right]$$

E_{Mi} - доставляемая материалу энергия

$$E_{Mi} = \tau / 2 \rho c \frac{A}{A_0} n_i p_i^2,$$

где A , A_0 - площадь поверхности мембраны применяемого и эталонного датчиков;

ρ и c - плотность жидкости и скорость распространения акустических волн;

n_i - число импульсов с амплитудой p_i , которые регистрируются в единице времени, используемой датчиком.

Для пьезоэлектрического датчика «Piezotronics 113A72»: эффективный диаметр мембраны $d_0 = 4,5$ мм, $A_0 = 15,9$ мм², $\tau = 10^{-5}$ с.

Это уравнение успешно решается классическим методом Рунге-Кутты четвертого порядка.

Применение вышеописанного подхода для прогнозирования кавитационной эрозии требует использования метода прогнозирования кавитационной нагрузки на основании теоретических расчетов либо модельных испытаний.[5]

Вопросы по теме:

1. Какова сущность водородного изнашивания?
2. Какие процессы происходят в зоне трения при водородном изнашивании?
3. Охарактеризовать явление кавитационного изнашивания.
4. Что представляет собой эрозионное изнашивание?
5. Как происходит эрозионное воздействие на поверхность?
6. Как моделируют кавитационную эрозию?

Литература

1. Лебедев О.В., Кадыров С.М. Цикл лекций по трибологии. Т, ТАДИ, 1997, с. 128
2. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машины. Справочник. М., Машиностроение, 1983, с. 320
3. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М., Машиностроение, 1989, с. 328
4. Sitnik L, Strömungskavitationsvercheleib. Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. – Wrocław, 2005 -162 s.
5. Гривнин Ю.А. Кавитация на поверхности твердых тел /Ю.А. Гривнин, С.П. Зубрилов –Л.: Судостроение, 1985 -122с.

9. Явление избирательного переноса при трении.

Избирательный перенос (ИП) был открыт Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагельским и как научное открытие зарегистрирован в 1966 г.

Впервые явление ИП было обнаружено в 50-х годах в тяжело-нагруженных узлах трения самолета ИЛ во время работы пары трения сталь - бронза при смазывании спиртоглицериновой смесью. На трущихся поверхностях деталей образовывалась пленка меди толщиной 1...2 мкм. Она снижала износ пары трения и силу трения примерно в 10 раз. Аналогичное явление было обнаружено также в паре сталь - сталь в узлах трения компрессора домашнего холодильника при смазывании маслофреоновой смесью.

Медная пленка в паре бронза — сталь образуется в результате анодного растворения бронзы (легирующие элементы цинк, олово, алюминий, железо уходят в смазочный материал, и поверхность обогащается медью). После того как поверхность бронзы и стали покроется медью, растворение прекращается, устанавливается режим избирательного переноса. Например, в узлах трения компрессора домашнего холодильника медная пленка на поверхностях трения в паре сталь — сталь возникла в результате растворения медных трубок охладителя компрессора. Ионы меди, поступая в маслянофреоновую смесь, двигались в зону контакта, где формировалась защитная медная пленка, из-за чего компрессоры холодильников могут работать без ремонта десятки лет

Глицерин - является восстановителем окиси и закиси меди. Поэтому поверхность трения медной пленки свободна от окисных пленок, она очень активна и способна к схватыванию со стальной поверхностью, так как имеет свободные связи. В результате этого стальная поверхность также покрывается тонким слоем меди. Эта пленка на бронзе уменьшается, что приводит к растворению бронзовой поверхности. Процесс идет до тех пор, пока на обеих поверхностях не образуется слой меди толщиной 1 ...2 мкм. Пара трения сталь - бронза становится парой трения медь - медь. На рисунке 9.1 представлены схемы контакта деталей при граничной смазке и наличии избирательного переноса.

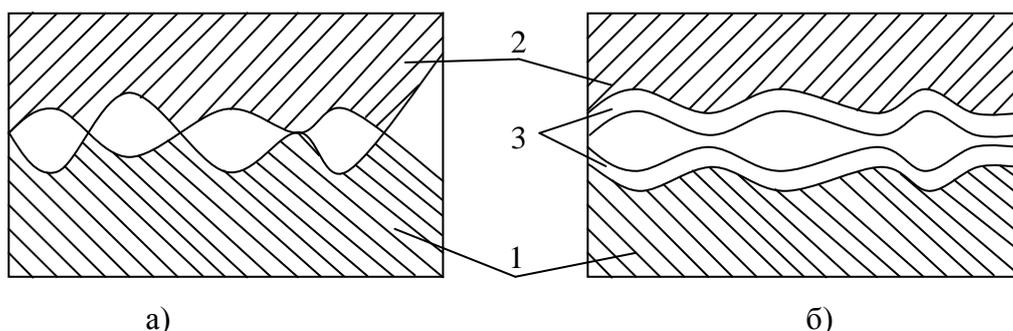


Рис. 9.1. Схема контакта деталей при граничной смазке (а) и наличии избирательного переноса (б): 1 - сталь; 2 - бронза; 3 - сервовитная пленка меди.

Металлическую защитную пленку, образующуюся в процессе трения, называют сервовитной (от лат. servo-witte — спасать жизнь). Она представляет собой вещество (в данном случае металл), образованное потоком энергии и

существующее в процессе трения. Трение не может уничтожить пленку, оно ее создает. Образование защитной пленки относится к новому классу самоорганизующихся явлений неживой природы.

При деформировании сервоитная пленка не разрушается и не подвергается усталостному разрушению. Она воспринимает все нагрузки, покрывая шероховатости поверхностей трения стальных деталей, которые практически не участвуют в процессе трения. В этих условиях мягкий материал работает по мягкому. Нагрузка распределяется равномерно по поверхности трения, поэтому на единицу площади она незначительна. Это способствует продлению ресурса узла трения.

При граничной смазке взаимодействие неровностей поверхностей вызывает усталостное изнашивание. При ИП трение непрерывное, площадки действительного контакта плоские. Имеющиеся методы определения площадей контакта, формулы сближения поверхностей, кривые опорной поверхности, а также методы и приборы для исследования свойств контакта не годятся для условий ИП.

Для анализа безызносности сформулируем основные факторы, определяющие износ: 1) пластические деформации, приводящие к наклепу поверхностей и разрушению микронеровностей; 2) окислительные процессы, приводящие к образованию при трении окисных пленок, которые хотя и препятствуют схватыванию и глубинному вырыванию, хрупки и быстро разрушаются; 3) внедрение отдельных участков поверхности одной детали в сопряженную поверхность другой, что при скольжении вызывает образование неровностей поверхностей и при многократном воздействии — их разрушение; 4) адгезионное схватывание, приводящее к переносу материала одной детали на другую и усилению изнашивания; 5) наводораживание поверхностей трения деталей, что ускоряет изнашивание деталей в зависимости от условий работы пары более чем на порядок.

В течение длительного времени главным направлением борьбы с изнашиванием и уменьшением силы трения было повышение твердости поверхности трения деталей машин. В этом случае уменьшается взаимное внедрение одной поверхности в другую, снижаются пластические деформации и окислительные процессы, а также действие абразива. Разработано много методов повышения твердости деталей: цементирование, азотирование, хромирование, цианирование, поверхностная закалка, наплавка твердыми материалами и др. Многолетний опыт свидетельствует, что это позволило повысить надежность и долговечность трущихся деталей. Так, электролитическое хромирование цилиндров двигателей внутреннего сгорания не только повысило износостойкость пары цилиндр — поршневое кольцо в 4—5 раз по сравнению с износостойкостью чугуновых цилиндров, но и в большой степени снизило потери на трение в цилиндро-поршневой группе двигателей.

Однако с увеличением нагрузок в узлах трения, ухудшающим в некоторых случаях условия смазывания деталей с применением в машинах специальных смазочных жидкостей, а в некоторых механизмах воды традиционные методы повышения износостойкости деталей путем увеличения их

твердости перестали себя оправдывать. Напомним, что фактическая площадь контакта с увеличением твердости материала уменьшается. В результате неизбежных перекосов деталей при эксплуатации увеличивается возможность их заедания или роста интенсивности изнашивания.

Образование пленки меди на бронзовой поверхности происходит в результате электрохимического процесса — процесса растворения металла.

Основная отличительная черта работы пары трения в режиме избирательного переноса - наличие физико-химических и электрических процессов, которые обеспечивают длительное существование сервовитной пленки, удерживают частицы износа в зоне контакта и снижают усилия сдвиговых деформаций. Вследствие образования сервовитной пленки между анодными и катодными участками поверхности бронзы процесс растворения может полностью прекратиться, наступит установившийся режим трения. Если по каким-либо причинам сервовитная пленка разрушается, то сразу возобновляются процессы, приводящие к ее восстановлению и поверхность будет обогащаться медью, пока снова не наступит пассивное состояние. Толщина пленки при избирательном переносе в 10...40 раз меньше толщины прирабочных покрытий, полученных гальваническими способами.

Физико-химические исследования структуры сервовитной пленки дали основание предположить, что материал пленки находится в состоянии, подобном расплаву. Пленка не способна к наклепу, имеет малые усилия сдвига, пориста, в верхней части она не имеет окислов, способна к схватыванию, при трении ее частицы могут переходить с одной поверхности трения на другую, т. е. схватываться без образования повреждений и увеличения сил трения. Трение бронзы о сталь в условиях ИП можно уподобить скольжению тела по льду, при котором низкий коэффициент трения обеспечивается пленкой расплавленного металла

Процесс образования сервовитной пленки при трении в паре сталь - сталь следующий. Пленка образуется, если в металлоплакирующих смазочных материалах содержатся мелкие частицы (порошки) бронзы, меди, свинца, серебра и др. При использовании глицерина или консистентной смазки ЦИАТИМ-201 с добавлением порошков, стальные поверхности деталей покрываются пленкой, состоящей из материала порошков. Пленки обладают высокой пластичностью и содержат в порах смазочный материал.

Образование сервовитной пленки при трении в паре сталь - сталь может происходить и в результате восстановления меди из ее закиси и окислов, вводимых в смазочный материал.

Обширные экспериментальные исследования механизма избирательного переноса были проведены в Московском институте нефтехимической и газовой промышленности им. акад. И.М. Губкина научным сотрудником Пичугиным В.Ф. в 1983 году.

Анализируя его исследование, выявлено, что при определенном соотношении величин давления и скорости скольжения отмечается резкое повышение коэффициента трения и износа при наличии на поверхности контакта медьсодержащей пленки. Так, например, при скорости скольжения

0,78 м/с в диапазоне давлений 5 - 20 МПа при трении по стали бронз БрАЖ9-4, БрОЦС5-5-5 в спиртоглицериновой среде предельными нагрузками являются соответственно 8 и 6 МПа.

Можно предположить, что при достижении определенных режимных параметров и температуры на контакте характер физико-химических процессов, состав и свойства защитных пленок изменяются, что влечет за собой снижение износостойкости образцов.

Проведенные эксперименты трения и изнашивания пары медный сплав — сталь в условиях ИП позволяют расположить сплавы по возрастанию их износостойкости в следующий ряд: БрОЦС5-5-5, БрАЖ.9-4, Л63. Наименьшие коэффициент трения и интенсивность изнашивания характерны для пары Л63 — сталь, в спиртоглицериновой среде. Так, при давлении 20 МПа коэффициент трения данной пары составил 0,008, в масле с присадкой — 0,009, в базовом масле при давлении 2 МПа — 0,12. Отсюда можно заключить, что чем меньше число легирующих металлов в сплаве, тем ниже коэффициент трения и выше износостойкость пары.

Изменение твердости стального образца-ролика (40ХН) от HRC 25 до HRC 54 ведет к возрастанию интенсивности изнашивания колодки из медного сплава (БрАЖ9-4, Л63) при постоянном коэффициенте трения.

Твердость стального образца определяет износостойкость пары только в начальный период реализации эффекта ИП в исследуемых средах. Далее формирование на фрикционном контакте медьсодержащей пленки приводит к уменьшению интенсивности изнашивания и сглаживанию различия по износостойкости колодок из медного сплава в зависимости от твердости стальных роликов. Уменьшение твердости стальных образцов способствует снижению интенсивности изнашивания медного сплава и пары в целом.

Большое внимание уделено изучению формирования защитной пленки и процессов трения и изнашивания пары медный сплав— сталь в указанных средах в начальный период взаимодействия в режиме ИП. Из полученных данных следует, что через 60 с работы образцов коэффициент трения достигает максимального значения, затем уменьшается и стабилизируется через 300 с. Время максимального значения коэффициента трения (60 с) не соответствует времени наибольшего износа колодки (120 с).

Осмотр образцов, работавших 60 с в режиме ИП, на микроскопе МИМ-7 показал, что на поверхностях трения ролика и колодки имеются продукты взаимодействия среды с металлом темного цвета, расположенные в микровпадинах, по внешнему виду соответствующие продуктам износа в глицерине. На поверхностях трения стального ролика заметны также включения медного сплава. Его масса за 60 с работы увеличилась.

С течением времени все большие участки поверхностей трения обоих образцов покрываются по направлению скольжения медьсодержащей пленкой, расположенной в основном, как показали результаты рентгеноспектрального исследования, в микровпадинах микронеровностей и представленной медью и легирующими элементами сплава.

Отделяемые частицы износа медного сплава шаржируют поверхность контактируемых образцов, обнажая ювенильные участки металла, что приводит к увеличению количества продуктов взаимодействия со средой и активизирует процесс проявления эффекта ИП.

Известно, что наличие в зоне трения образцов абразивных частиц определенных размеров (до $3 \cdot 10^{-6}$ м) способствует более эффективному проявлению ИП в глицерине и снижению характеристик трения по сравнению с работой в глицерине без абразива. Эксперименты показали, что при изнашивании пары медный сплав — сталь в базовом масле диапазон размеров частиц износа составил $1,9-21,52 \cdot 10^{-6}$ м.

В начальной стадии эффекта ИП преобладающим процессом является намазывание медного сплава на стальную поверхность; это соответствует максимальному значению коэффициента трения.

Обнаружено, что максимальной износостойкостью в режиме ИП в глицерине обладают наиболее чистые медные сплавы в паре со сталью. При таком сочетании на контакте действуют факторы, обеспечивающие эффект безыносного трения, а коэффициент трения соответствует гидродинамической смазке.

Износостойкость стальных образцов, поверхность трения которых покрывается пленкой, содержащей электрохимически осажденную медь, превосходит износостойкость пары медный сплав — сталь в спиртоглицериновой смеси или в среде масла с присадкой.

Ювенильные поверхности меди на контакте активизируют процессы образования органической аморфной пленки, покрывающей медную и обеспечивающей безыносное трение. В условиях ИП медная пленка покрыта пленкой прозрачного аморфного вещества при изнашивании пары медный сплав — сталь в глицерине или пары сталь — сталь в глицерине с добавкой неорганических солей меди.

В поверхностном слое стального образца, работавшего в условиях ИП, железо также химически связано с элементами смазочной среды. Послойные ожеспектральные исследования медьсодержащей пленки, полученной в условиях ИП, показали, что поверхностный слой представлен в основном углеродом, затем содержание углерода значительно уменьшается, имеется кислород, а ниже медь, железо.

В первоначальный момент работы пары медный сплав — сталь под действием приложенной нагрузки происходит диспергирование более мягкого металла, удаление с поверхности медного сплава окисленных соединений меди, намазывание медного сплава на стальной образец. Этот период взаимодействия характеризуется ростом коэффициента трения, изнашиванием медного сплава и увеличением массы стального образца. За счет механо-физико-химических процессов при трении в смазочной среде образуются кислоты, которые при наличии ювенильных поверхностей меди способствуют реакции этерификации. Продукты износа, попадая в зону трения пары медный сплав — сталь, действуют как абразив по отношению к медному сплаву, оказывают царапающее и режущее действие, обнажают

ювенильные поверхности меди и разрушаются. Это способствует более активному протеканию химических реакций и формированию аморфного органического вещества сложно-эфирного состава на большей фрикционной ювенильной поверхности меди. Процесс образования медной пленки на поверхностях трения продолжается до тех пор, пока пленка сложноэфирного вещества не покрывает всю площадь зоны контакта. Коэффициент трения пары медный сплав — сталь низкий, масса стального и медного образца увеличивается, заканчивается процесс образования медьсодержащей пленки.

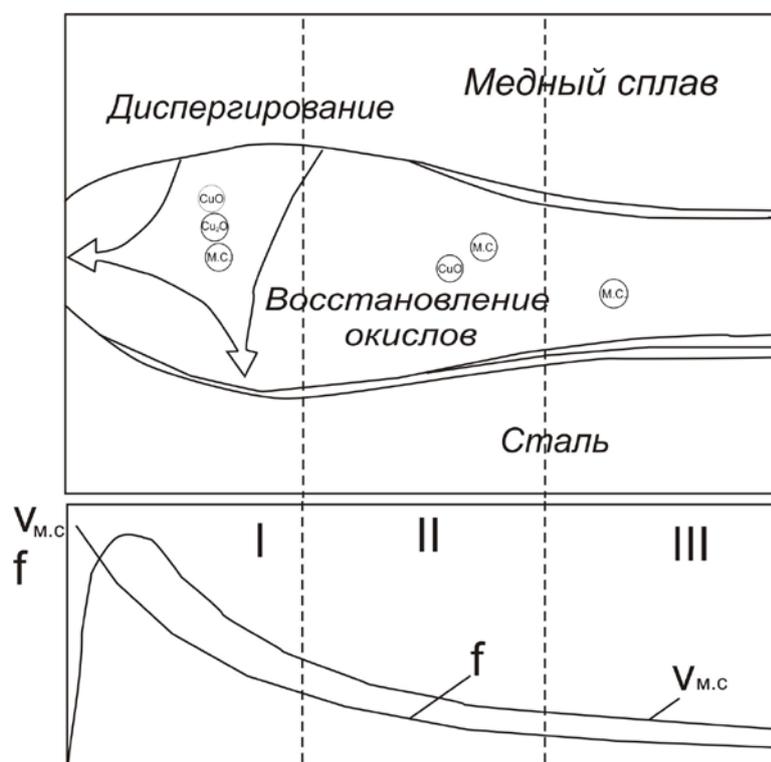


Рис. 9.2 Схема взаимодействия триады трения в условиях ИП: I — начальная стадия; II — образование медной пленки; III — установившийся режим

Установившийся режим ИП характеризуется стабилизацией химического и фрикционного состава смазочной среды, поверхностных пленок, значений коэффициента трения и интенсивности изнашивания пары. В данном режиме коэффициент трения, соответствующий режиму гидродинамической смазки, обеспечивается в основном пленкой органического вещества, которая, видимо, является термопластичной.

При установившемся режиме ИП аморфная пленка под действием абразивных частиц износа диспергируется и затем восстанавливается. Повышение коэффициента трения и интенсивности изнашивания при достижении определенных режимных параметров и температуры на контакте объясняется разрушением аморфной пленки, которая превращается в смолообразный продукт, а медьсодержащая пленка не обеспечивает условий, характерных для режима гидродинамической смазки.

Различные характеристики трения для разных сплавов объясняются их физико-химическим составом и влиянием легирующих элементов на количество и качество медной и аморфной пленок.

Реализация эффекта ИП в смазочных маслах позволяет повысить износостойкость стальных пар трения в 10 раз. Рентгеноспектральные, рентгеноструктурные, электронографические, оже-спектральные исследования медьсодержащей пленки, полученной при изнашивании стальных пар в смазочных маслах с присадкой, показали, что ее состав и строение аналогичны составу и строению медьсодержащей пленки, образующейся на фрикционных поверхностях при трении пары медный сплав — сталь в глицерине.

В режиме избирательного переноса могут работать металлы, металлополимеры, металлокерамические материалы, наполненные стекла, сплавы благородных металлов, композиционные материалы на основе эпоксидной смолы и др.

Например, при жестких режимах трения эффективно применение олова для поршневых колец и поршней. Наличие олова в горячих зонах снижает коэффициент трения до 0,04...0,05. Наибольший эффект покрытия оловом достигается на поверхностях с шероховатостью $R_A=3,5...4,5$ мкм. Важным свойством оловянного покрытия является способность перераспределения слоя, заполнение впадин неровностей поверхности, понижающие давление и исключают критические нагрузки. В результате сопряженные детали имеют малый износ.

Свинцовое покрытие достаточно пластично и легкоплавко (почти как олово), улучшает прирабатываемость, повышает сопротивляемость задиру, но быстро окисляется в цилиндре дизеля, недолговечно и не перспективно как приработочное средство для поршневых колец.

Близок по свойствам к олову кадмий. Однако он менее пластичен, результаты, полученные при испытании образцов с кадмиевым покрытием, ниже, чем с оловянным.

Эффективны композиционные приработанные покрытия меди и дисульфида молибдена, осажденные одновременно, и двухслойные покрытия меди и олова. Эти покрытия в 1,8...2,4 раза ускоряют приработку образцов поршневых колец к чугунным образцам цилиндрических втулок, до 1,4 раза повышают сопротивляемость задиру. Двухслойные покрытия колец медью и оловом обладают положительными качествами этих материалов. В начале приработки олово устраняет возникновение очагов критических давлений крупных узлов схватывания. Медь, находящаяся под слоем олова, благодаря высокой теплопроводности "рассасывает" температурные вспышки на "горячих площадках". По-видимому, олово в этот период диффундирует в медь и улучшает ее антифрикционные свойства. После износа слоя олова на частично приработанной поверхности может проявиться эффект избирательного переноса, положительно влияющий на работу сопряжения.

По длительности действия, качеству приработки поверхностей и стойкости к задирам лучшими считаются медьсульфидмолибденовые покрытия.

Для снижения интенсивности изнашивания поршневых колец гильз цилиндров в период всего срока службы двигателей рекомендуется использовать вставки из медных сплавов. Для снижения износа цилиндров

двигателей внутреннего сгорания производят меднение поршневых чугунных колец.

Разработка смазочных материалов, отнесенных директивными решениями к категории реализующих "эффект безызносности", из-за отсутствия фундаментальных исследований механизма безызносного трения, а также эффективных методов оценки способности смазочных материалов обеспечивать этот эффект, проводилась на недостаточно высоком профессиональном уровне, бессистемно, эмпирическим путем. В большинстве случаев она основывалась только на результатах трибометрической оценки эффективности смазочных материалов.

Другие важнейшие физико-химические характеристики, в совокупности определяющие работоспособность смазочных материалов в условиях эксплуатации, не учитывались. Это, также, ошибочные представления о возможности применения разработанного смазочного материала безотносительно к условиям эксплуатации конкретных узлов трения явились основными причинами того, что показанная в условиях лабораторного или некорректного эксперимента высокая эффективность предложенных смазочных материалов, как правило, не подтверждалась в ходе государственных испытаний.

Вопросы по теме:

1. В чем суть научного открытия об избирательном переносе?
2. Дать понятия сервовитной пленки.
3. Какие отличия в контактировании деталей при граничной смазке и избирательном переносе.
4. Каков механизм образования сервовитной пленки.
5. Дать физические основы эффекта безызносности
6. Как было обнаружено явление ИП?
7. Как образуется медная пленка в паре сталь-бронза?

Вопросы по самостоятельной работе.

1. Выполнить реферат по использованию нанотехнологий в машиностроении.

Литература

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника: Учебник для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1989, 328 с.
2. Лебедев О.В., Кадыров С.М. Основы трибологии. Т., изд. ТАДИ, 2000, 176 с.
3. Литвинов В.Н., Михин Н.М., Мышкин Н.К. Физико-химическая механика избирательного переноса при трении. М., Наука, 1979, с. 188

10. Конструктивные и технологические способы повышения износостойкости.

10.1. Конструктивные способы повышения износостойкости.

10.1.1. Конструктивные способы повышения износостойкости

Конструктивные способы повышения износостойкости рассмотрим на примере основных принципов конструирования подшипниковых узлов.

Существующие методы расчетной оценки долговечности подшипников качения базируются на теории усталостной прочности рабочих поверхностей и не позволяют учитывать многие факторы, оказывающие влияние на процесс утраты работоспособности подшипниковых узлов, выход из строя которых обусловлен изменениями микро- и макрогеометрии трущихся поверхностей в результате изнашивания, старением смазочного материала или накоплением пластических деформаций в зонах контакта.

В зависимости от функционального назначения подшипникового узла оценка его работоспособности производится по разным критериям: величине зазора, моменту сопротивления вращению, температуре, точности вращения и т.д. Недостающие для конструирования данные в этих случаях приходится получать из испытаний на специальных машинах трения, позволяющих, например, узнать, что за 2 часа испытаний средний износ шариков получается 7-8 мкм, внутреннего кольца 1,5 - 2 мкм, наружного кольца 2,3-2,5 мкм и т.д. Масса сепаратора также уменьшается вследствие износа, несмотря на то, что его трущиеся поверхности шаржируются абразивными частицами. В результате шаржирования сепаратор приобретает свойства шлифовального круга и как бы «шлифует» кольца. Увеличение среднего размера абразивных частиц с 5 до 12 мкм приводит к росту износа примерно в 4 раза, а внутреннего - в 6 раз и более. Это объясняется повышением режущей способности абразивных частиц, внедрившихся в сепаратор и находящихся в зоне трения. Чем выше нагрузка, тем больше геометрические погрешности шариков после испытаний, что связано со стабилизацией осей собственного вращения шариков, обуславливающей неравномерное распределение износа по их поверхностям. Все это учитывается при обосновании конструктивных способов повышения износостойкости подшипников.

Для широкого диапазона габаритных размеров, нагрузок и скоростей механизмов транспортных машин можно выделить следующий комплекс общих требований, которым должен удовлетворять любой подшипниковый узел для обеспечения надежной работы установленных в нем опор качения.

1. Конструктивное и технологическое обеспечение соосности посадочных мест подшипников каждого из валов, достигаемое, как правило, расточкой, а если возможно, шлифовкой на проход двух или нескольких гнезд под подшипники для каждого вала.

2. Возможное снижение числа стыков в элементах узла, например, использование стаканов и переходных втулок, в которых вмонтированы

подшипники, лишь в тех случаях, когда конструктивное решение без них было бы невозможным

3. Выбор посадок внутренних колец на вал и наружных колец в корпус с обеспечением жесткой связи за счет посадочного натяга для того кольца, которое вращается вместе с валом или корпусом. При этом посадки с большими натягами допустимы лишь при очень больших и особенно при ударных нагрузках.

В малогабаритных приборах оптимальными являются натяги 1 - 3 мкм. Для невращающихся колец натяг заменяется небольшим зазором.

4. При сравнительно длинных валах $l = (10 \div 12)d$ монтаж одной из опор с фиксацией в осевом направлении, а остальные "плавающие", т.е. без осевой фиксации. "Плавающий" подшипник, жестко фиксированный своим вращающимся кольцом, должен иметь посадку для второго кольца, позволяющую ему с малым сопротивлением перемещаться при тепловых деформациях вала или корпуса. Фиксируется, как правило, более нагруженный подшипник, на который передаются возможные двусторонние осевые усилия, что должно быть учтено при его выборе.

5. Если перекос вала вследствие смещения осей гнезд под подшипники превосходит 15 - 20', лучше использовать самоустанавливающиеся (сферические) подшипники. В этом случае схема установки с фиксированной опорой обязательна.

6. Отклонения от перпендикулярности заплечиков вала и корпуса относительно оси вращения должны быть минимальны. В зависимости от точности узла они находятся в пределах 2 - 20 мкм, причем для крупных подшипников допустимы несколько большие отклонения.

7. Исключение (по возможности) регулировки осевого смещения подшипников резьбовыми деталями, так как даже при мелкой резьбе, определенный перекос упорного торца неизбежен.

8. Использование упорных подшипников на горизонтальных валах, несмотря на их повышенную осевую жесткость, нежелательно, а при повышенных частотах вращения вообще недопустимо из-за возникновения возможности смещения комплекта шариков с сепаратором относительно колец при разгрузке подшипника, а также вследствие гироскопических эффектов и нагружения краев колец центробежными силами шариков. В этом случае используются упорно-радиальные или радиально-упорные подшипники.

9. Осевое крепление концевых подшипников на валах обязательно при значительных и особенно при ударных нагрузках. Легкие приборные подшипники, как правило, не требуют осевого крепления при наличии правильно выбранных посадок. При этом осевая фиксация должна обеспечиваться крышкой или заплечиком корпуса.

10. Установка радиально-упорных подшипников враспор с фиксацией и регулировкой торцевыми крышками допустима при длине валов $L \leq (10 \div 12) d$. При большей длине валов лучше устанавливать сдвоенный радиально-

упорный шарико- или роликоподшипник и прочие опоры выполнять "плавающими".

11. При вращающихся наружных кольцах и установке двух радиально-упорных подшипников на оси неизбежна регулировка гайкой, навинчивающейся на резьбовой хвостовик этой оси. Гайка и хвостовик должны иметь мелкую резьбу и надежный замок против саморазвинчивания.

12. Для осевой фиксации подшипников допустимо использование пружинных колец, вставляемых в проточки на валу или в корпусе. При больших осевых усилиях установка стопорных колец недопустима.

13. Безбортовые кольца плавающих роликоподшипников с короткими цилиндрическими роликами должны иметь двустороннюю фиксацию, поскольку "плавание" обеспечивается небольшим осевым смещением роликов по неподвижной (в осевом направлении) дорожке качения безбортового кольца.

14. Пластичные смазочные материалы должны закладываться в корпуса в объемах не более $1/3$ свободного пространства, не занятого подшипником.

15. Жидкие масла заливаются в корпус до уровня центра тела качения, расположенного в подшипнике ниже всех других тел качения.

16. При фитильном смазывании рекомендуется, чтобы фитиль упирался в маслоподъемный корпус, примыкающий к внутреннему кольцу подшипника на уровне зазора плавления сепаратора.

17. При вращающихся уплотнениях и маслоотбойных шайбах необходимы гарантированные зазоры их относительно корпусных гнезд в пределах $0,3 \div 1,5$ мм.

Эффективность приведенных выше конструкторских приемов подтверждена заводской практикой.

Область конструктивных способов обеспечения высокой работоспособности узлов трения охватывает системную группу проблем, каждый элемент которой должен получить оптимальное разрешение.

Круг основных направлений действий конструктора показан на схеме (табл.10.1).

Таблица 10.1

Общая схема основных элементов создания конструкции, узлов трения



10.1.2. Влияние параметров дизелей на износ пар трения

В процессе эксплуатации автотракторных двигателей на их работу влияют такие факторы, как температурный режим, чистота фильтрации воздуха, атмосферное давление и др.

В настоящее время создан ряд совершенных систем, обеспечивающих поддержание заданного температурного режима двигателя и высокую степень очистки воздуха. Имеющий место повышенный износ в условиях рядовой эксплуатации связан с работой двигателя в неустановившемся режиме, вызываемом колебанием нагрузки на валу, изменением подачи топлива в цилиндры, а также реакцией двигателя на эти воздействия. Реакция зависит как от характеристик самого двигателя, так и от системы регулирования подачи топлива, определяющей действие сил, скоростей и ускорений, возникающих в КШМ в сопряжении гильза – кольцо – поршень и вызывающих повышенную скорость изнашивания и определяется анализом переходного процесса.

Переходным процессом называется процесс изменения во времени параметров двигателя, входящих в функциональную зависимость, вследствие изменения нагрузки, воспринимаемой двигателем, смены регулируемого режима обслуживающим персоналом или других произвольных изменений внешних условий работы.

В общем случае переходный процесс двигателя обуславливается изменением нагрузочного и скоростного режимов его работы.

Математическим выражением переходного процесса является общий интеграл дифференциального уравнения системы регулирования. Переходный процесс состоит из алгебраической суммы аperiodических и колебательных составляющих.

Число составляющих определяется порядком дифференциального уравнения системы, т.е. числом корней характеристического уравнения.

Экспериментальными исследованиями установлено, что при работе двигателя в установившемся режиме увеличение крутящего момента на коленчатом валу вызывает приращение износа пар трения ЦПГ и КШМ. При этом скорость изнашивания определяется как конструктивными параметрами двигателя и материалом пар трения (ходом поршня L , величиной приведенного к коленчатому момента инерции I , распределением неровностей по высоте k_0 и пределом текучести σ_s), так и величинами амплитуды и скорости изменения нагрузки, а также динамическими характеристиками самого двигателя и системы регулирования частоты вращения коленчатого вала. В условиях эксплуатации, когда момент сопротивления m_c движению от действия микрорельефа дороги постоянен и $\Delta m_c = 0$, а изменяется только величина подачи топлива в цилиндры, приращение крутящего момента Δm , развиваемого двигателем затрачивается на преодоление сил инерции

$$\Delta m = I \frac{\pi}{30} \frac{d\Delta n}{dt} \quad (10.1)$$

где n – частота вращения коленчатого вала; t – время.

Приращение крутящего момента вызовет приращение скорости изнашивания Δu_1 пар трения. По данным С.М. Кадырова и О.В. Лебедева:

$$\Delta u_1 = I \frac{k_0 k_1}{\sigma_s} \frac{\pi L}{30r} \frac{d^2 \Delta n}{dt^2} \quad (10.2)$$

где k_1 - параметр, зависящий от эффективности работы базового масла и присадок в режиме граничного трения

Наибольшее влияние на суммарную диссипативность пар трения ДВС оказывают свойства смазочного слоя и контактное давление. Несмотря на малую толщину, присутствие смазочного слоя увеличивает значение декремента колебаний по сравнению с «сухим стыком» в 2-3 раза. Также существенное отличие имеет демпфирующая способность смазочного слоя в зависимости от его собственной структуры и свойств смазочного материала.

При пульсации давления (в динамически нагруженном стыке) за каждый период упругих колебаний происходит необратимый процесс перехода молекул из одного поворотно-изомерного состояния в другое, вследствие чего происходит интенсивная диссипация энергии.

Если в обычные смазочные жидкости добавить вещества с указанным свойством, то наблюдается высокий эффект диссипации энергии смазочным слоем (рис.10.1., кривая 2).

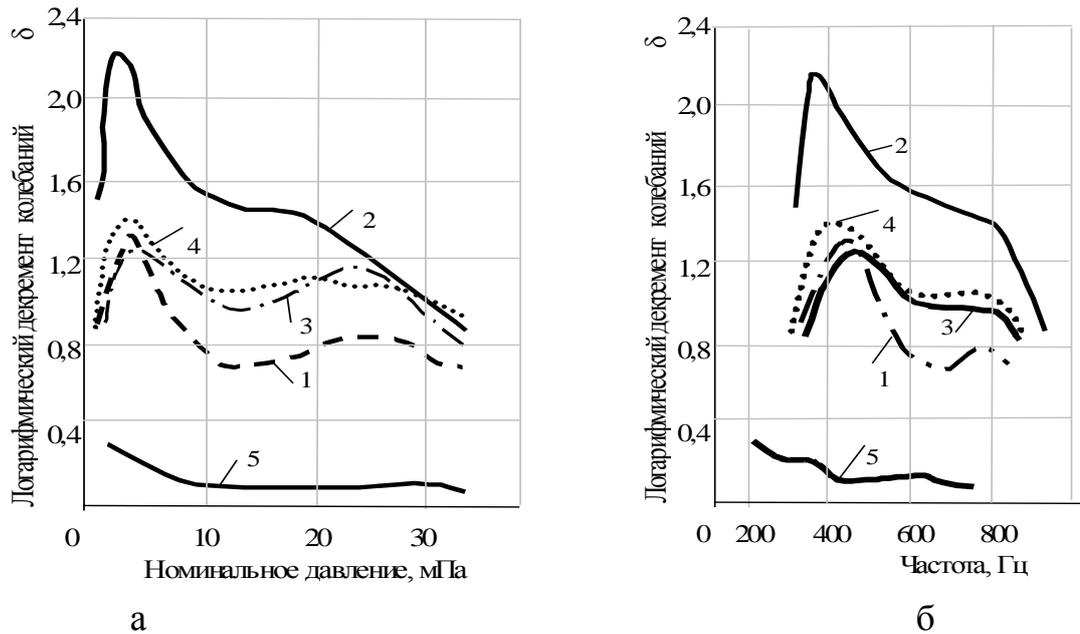
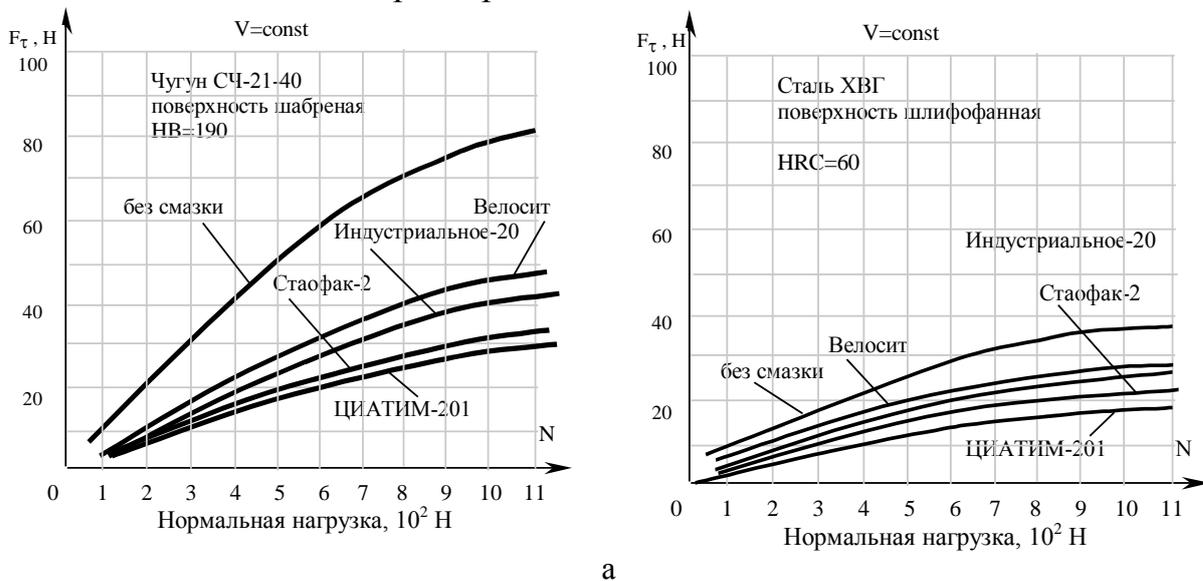
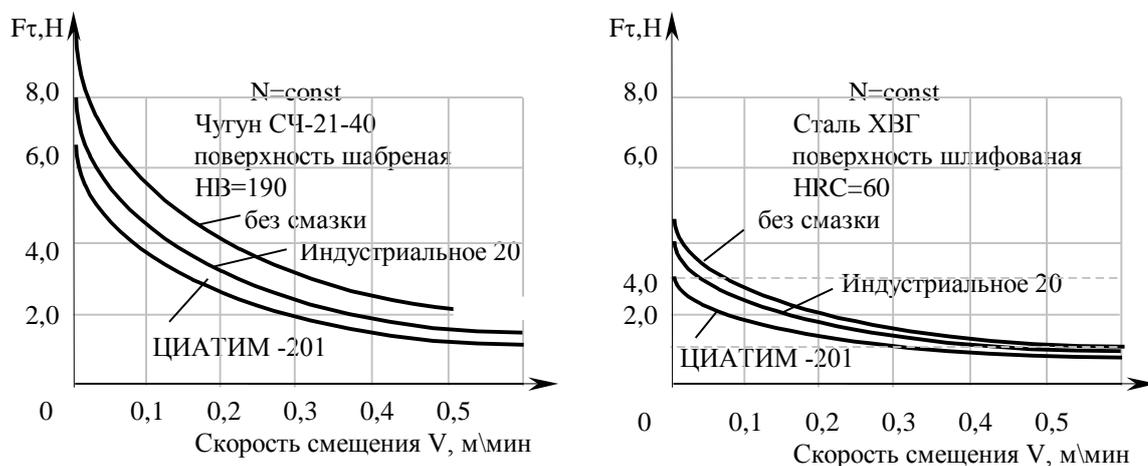


Рис.10.1. Результаты исследования зависимости логарифмического декремента колебаний: а – от величины номинального давления в паре трения; б – от частоты возмущающей силы.

В силу касательной упругости в контакте вначале наблюдается упругое сопротивление участка, как это показано на рис.10.2. После достижения некоторой величины перемещения, обычно около 0,001 мм, происходит прыжок и начинается перемещение путем трения скольжения. Это явление называют предварительным смещением.





б

Рис.10.2. Характеристики предварительного смещения:

а - характер зависимости предельного значения силы предварительного смещения от нормальной нагрузки; б - характер зависимости предельного значения силы предварительного смещения от скорости движения

Как видно из приведенных экспериментальных данных, на силу сопротивления при касательном смещении оказывают существенное влияние смазка, вид обработки поверхностей и их состояние.

Для преодоления скачков при малых скоростях движения, вызываемых предварительным смещением, создают специальные «антискачковые» смазки. Эффект уменьшения силы и величины скачка достигается применением поверхностно-активных добавок, предотвращающих контакт неровностей металлических поверхностей и переносящих трение вовнутрь смазочного слоя.

При одновременном изменении нагрузки на коленчатом валу и подачи топлива в цилиндры скорость изнашивания u деталей ЦПГ и КШМ складывается из скорости изнашивания подачи топлива – управляющее воздействие $h(t)$ – и скорости изнашивания u_2 от изменения нагрузки на коленчатом валу – возмущающее воздействие $m_c(t)$ –

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) \quad (10.3)$$

С учетом изображения по Лапласу уравнение (2) в операторной форме имеет вид

$$U(P) = I \frac{\pi L}{30r} \frac{k_0 k_1}{\sigma_s} P^2 N(P), \quad (10.4)$$

где P – оператор дифференцирования.

Так как приращение скорости изнашивания пар трения связано с изменениями управляющего или возмущающего воздействия, то исходя из понятия передаточной функции динамические связи между выходными и входными параметрами определяют как отношение преобразованных по Лапласу выходных параметров к входным, также преобразованным по Лапласу, при нулевых начальных условиях, т.е.

$$D_1(P) = I \frac{\pi L}{30r} \frac{k_0 k_1}{\sigma_s} P^2 V(P), \quad (10.5),$$

где $D_1(P) = U_1(P)/H(P)$ – частная передаточная функция скорости изнашивания пар трения двигателя по управляющему воздействию; $V(P) = N(P)/H(P)$ – частная передаточная функция частоты вращения коленчатого вала двигателя по управляющему воздействию. Частная передаточная функция (динамическая характеристика) пар трения ЦПГ и КШМ дизеля по возмущающему воздействию имеет вид [1,2]

$$D_2(P) = \frac{IL}{r} \frac{k_0 k_1}{\sigma_s} P \left[I^{-1} + \frac{\pi}{30} P W(P) \right], \quad (10.6)$$

Поскольку в условиях эксплуатации трактора нагрузка на коленчатом валу и подача топлива в цилиндры колеблются относительно средних установившихся значений, то скорость изнашивания пар трения ЦПГ и КШМ равна сумме скоростей изнашивания в установившемся U_0 и неустановившемся ΔU режимах.

при приращении подачи топлива $\Delta H(2\pi f)$ в цилиндры.

$$U_1(2\pi f) = u_0 + \Delta H(2\pi f) \left| D_1(2\pi jf) \right|; \quad (10.7)$$

при приращении нагрузки $\Delta M_c(2\pi f)$ на коленчатом валу

$$U_2(2\pi f) = u_0 + \Delta M_c(2\pi f) \left| D_2(2\pi jf) \right|. \quad (10.8)$$

Используя динамические характеристики, полученные О.В. Лебедевым и К.А. Шариповым уравнение (10.3) можно записать в виде:

$$U(2\pi f) = U_0 + \frac{\pi k_0}{30\sigma_s} \frac{IL}{r} P \left(\left| I^{-1} + P W(P) \right| + \left| P V(P) \right| \right) \left| \frac{\Delta M_c(2\pi f)}{\Delta H(2\pi f)} \right|, \quad (10.9)$$

где $j^2 = -1$; $P = 2\pi jf$.

Как следует из уравнения (10.9), процесс скорости изнашивания U носит дифференцирующий характер, о чем свидетельствует наличие оператора P , представляет собой сумму скоростей изнашивания от управляющего U_1 и возмущающего воздействий и определяется динамическими характеристиками самого двигателя, системы регулирования подачи топлива в цилиндры, частоты вращения коленчатого трения, применяемых при граничном трении смазочных материалов.

Таким образом, получены частные передаточные функции скорости изнашивания пар трения ЦПГ и КШМ, которые можно использовать на стадии проектирования двигателей.

Спектр частот максимальной скорости изнашивания увеличивается от 0,4 до 1 Гц, исходя из частотных характеристик скорости изнашивания КШМ дизеля Д-240. При этом содержание Al в картерном масле колеблется в пределах $1,5 \cdot 10^{-3}$ – $3,2 \cdot 10^{-3}$ Г.

Представленные аналитические зависимости (10.5) и (10.9) указывают на возможность управления скоростью изнашивания пар трения путем подбора хода поршня, радиуса кривошипа и приведенных к коленчатому валу маховых масс.

Для подтверждения теоретически установленной зависимости проводились экспериментальные исследования частотных динамических характеристик двигателей Д-144 и Д-240.

На рис.10.3,10.4,10.5 приведены амплитудно-частотные характеристики крутящего момента по возмущающему и управляющему воздействиям двигателя Д-240.

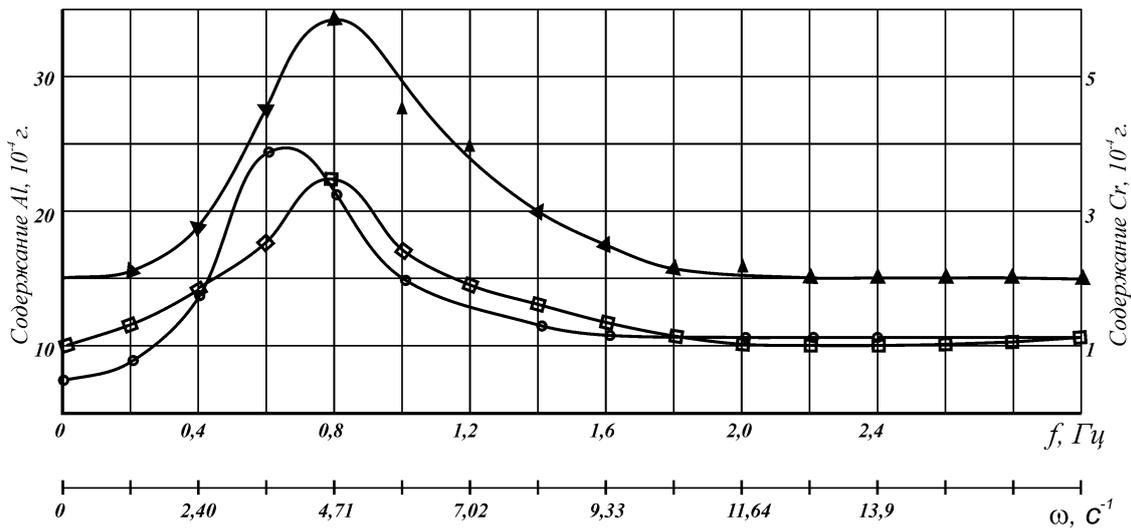


Рис.10.3. Частотные характеристики скорости изнашивания КШМ двигателя:

- \square - содержание Al в картерном масле;
- Δ - содержание Cr в картерном масле;
- \circ - расчетная кривая скорости изнашивания КШМ.

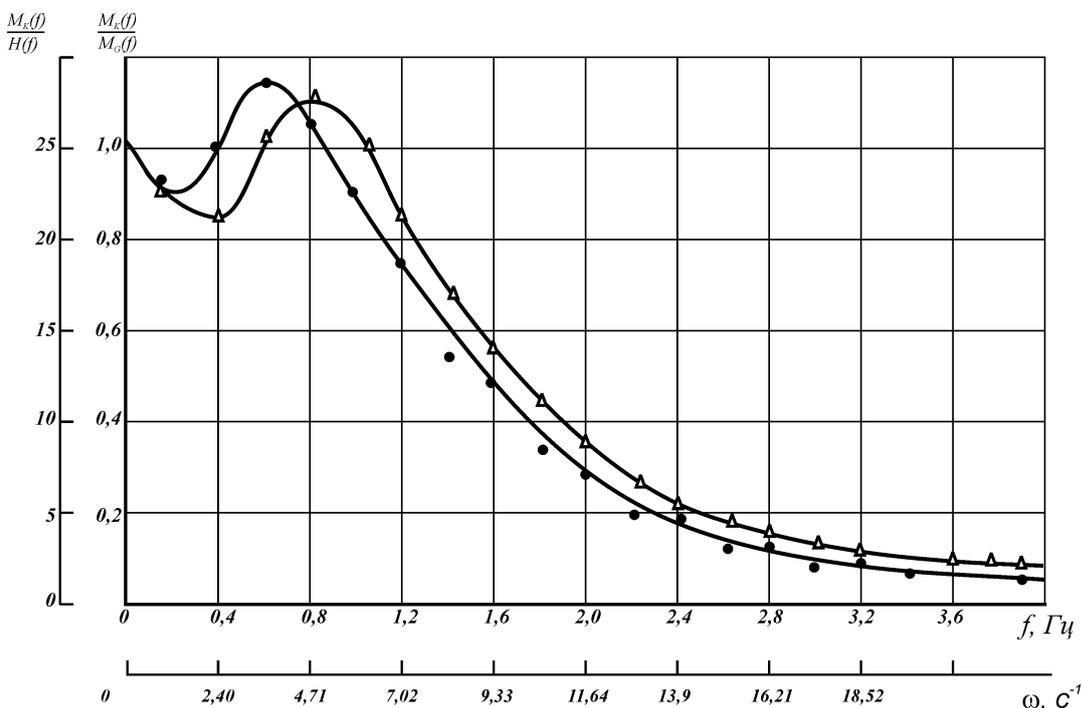


Рис.10.4. Амплитудно-частотные характеристики крутящего момента:
 Δ и \circ - по возмущающему и управляющим воздействиям.

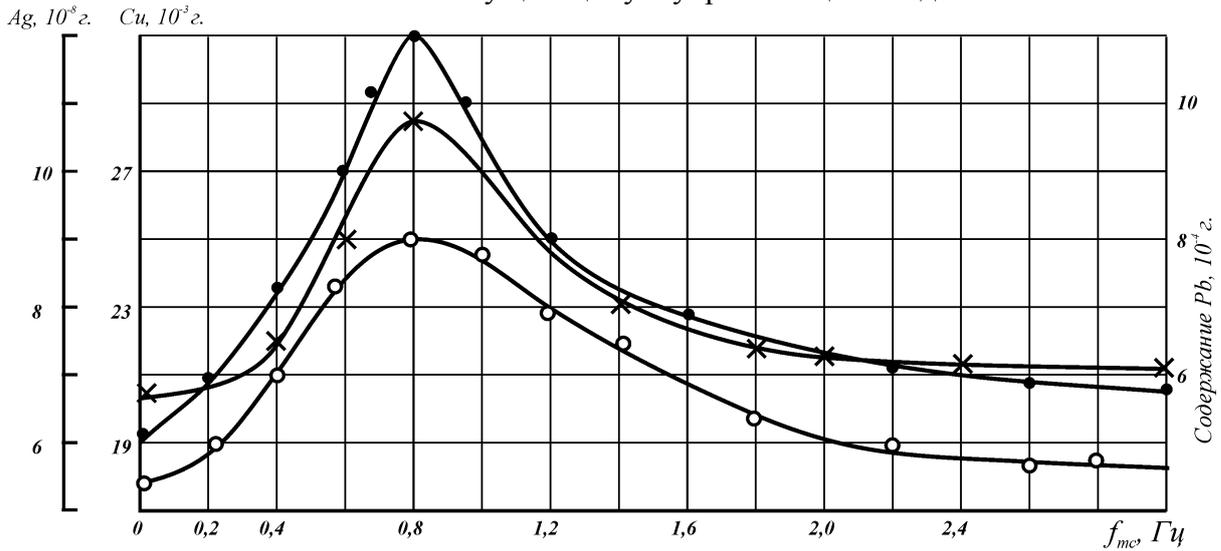


Рис.10.5. Частотные характеристики скорости изнашивания КШМ двигателя: \bullet , \times и \circ - содержание в картерном масле Cu, Pb и Ag.

Аппроксимация аналитическими выражениями амплитудно-частотных характеристик позволила получить, например, частные передаточные функции (динамические характеристики) крутящего момента:
 по управляющему воздействию $\sigma_1(P)$

$$\sigma_1(P) = \frac{0,346P^2 + 0,91P + 1}{0,0137P^4 + 0,101P^3 + 0,419P^2 + 1,28P + 1} \quad (10.10)$$

по возмущающему воздействию $\sigma_2(P)$

$$\sigma_2(P) = \frac{0,354P^2 + 0,416P + 1}{(0,796P + 1)(0,0484P^2 + 0,286P + 1)(0,15P + 1)} \quad (10.11)$$

скорости изнашивания:

$$D_1(P) = \frac{0,00443P^3 + 0,0117P^2 + 0,128P}{0,0137P^4 + 0,101P^3 + 0,419P^2 + 1,28P + 1} \quad (10.12)$$

$$D_2(P) = \frac{0,495P^3 + 0,582P^2 + 1,4P}{0,00576P^4 + 0,0799P^3 + 0,438P^2 + 1,232P + 1} \quad (10.13)$$

В диапазоне частот изменения внешних возмущающих и управляющих воздействий от 0,15 до 0,4 Гц превышение амплитуды крутящего момента меньше превышения амплитуды внешнего управляющего воздействия.

В диапазоне частот от 0,15 до 0,55 Гц приращение амплитуды крутящего момента меньше приращения амплитуды момента сопротивления. Начиная с частоты 0,4 Гц по управляющему воздействию и от 0,55 Гц по возмущающему, амплитуды крутящего момента больше амплитуд внешних

входных воздействий и достигают максимального значения на частотах 0,6 и 0,8 Гц. Характеристика по управляющему воздействию имеет большую инерционность по сравнению с частотными характеристиками крутящего момента по возмущающему воздействию. Превышение амплитуды момента над амплитудой входного воздействия, сопровождается повышенной скоростью изнашивания пар трения, свидетельствует о наличии параметрического резонанса в двигателе в режиме граничной смазки.

10.1.3 Податливость элементов системы приводов машин.

Увеличение податливости одной из деталей сопряженного узла или, наоборот, повышение жесткости детали либо узла в целом может благоприятно влиять на его долговечность. В других случаях положительное воздействие может оказать коррекция формы рабочих поверхностей деталей.

Податливость детали, общая или местная, позволяет ее рабочей поверхности следовать за деформацией сопряженной детали и приспособляться к неточностям ее геометрической формы. Самоустанавливающийся опорный подшипник является простейшим примером конструкции, имеющей деталь свободной податливости в виде вкладыша, обладающего угловой подвижностью. Полнее роль податливости проявляется в резинометаллических вкладышах и гуммированных деталях, во вкладышах из пластмасс и мягких покрытиях рабочих поверхностей.

Сухая резина имеет коэффициент трения выше, чем у других материалов, и в то же время в паре со сталью, бронзой и латунью при смазывании такой маловязкой жидкостью, как вода, имеет высокие антифрикционные свойства. Это объясняется тем, что гибкая и легко деформирующаяся резина хорошо приспособляется к неровностям поверхности вала без нарушения в зоне нагружения непрерывности смазочного слоя. Последний благодаря этому для сохранения режима при жидкостной смазке может быть меньшей толщины, чем при металлической поверхности вкладыша. Высокая способность деформации резины обуславливает более равномерное распределение давления по длине вкладыша. Абразивные частицы, содержащиеся в воде, вминаются в мягкую поверхность резины, перекатываются по ней, не производя режущего действия, и выносятся с водой в смазочную канавку. При наличии песка, ила и грязи в смазывающей и охлаждающей подшипник воде вкладыш изготавливают с большим количеством канавок и подбирают резину с высокой износостойкостью. Резинометаллические вкладыши устанавливают в соответствующих устройствах транспортных и строительно-дорожных машин.

Долговечность работы машин определяется износостойкостью их основных деталей. Например, детали, изготовленные из отбеленных чугунов и марганцовистой стали, имеют срок службы всего 2—3 месяца из-за усиленного абразивного изнашивания. Для повышения износостойкости деталей их выполняют с податливой рабочей поверхностью, которую не режут абразивные частицы.

Звенья передаточных механизмов приводов исполнительного устройства машин не являются абсолютно жесткими. Под действием

нагрузок они дифференцируются. Вследствие этого законы движения отдельных точек функциональных звеньев исполнительного устройства отличаются от программных, задаваемых двигателями. Деформации звеньев передаточных механизмов, вызываемые статистическими нагрузками и приводящие к смещению положения равновесия рабочего органа, представляют собой статистическую погрешность позиционирования привода.

Передача движения от двигателя к функциональному звену исполнительного устройства осуществляется посредством передаточных механизмов, каждый из которых состоит из отдельных элементов: валов, зубчатых колес, винтов и т.д. податливость вала, работающего на кручение, град/ Н·мм,

$$l = \frac{\varphi}{M_{кр}} = \frac{1}{GJ_p},$$

где φ - угол поворота одного поперечного сечения вала относительно другого, отстоящих друг от друга на расстоянии l , град;

$M_{кр}$ – крутящий момент, Н мм; l – длина вала, мм; G - модуль упругости второго рода материала вала, мПа; J_p – полярный момент инерции вала, мм⁴.

$$J_p = \frac{\pi d^4}{32},$$

где d – диаметр вала, мм.

Податливость зубчатой передачи, связанная с деформацией зубьев, град/ Н·мм,

$$e = \frac{\varphi}{T} = \frac{1}{K_3 r_w^2 b},$$

где r_w – радиус начальной окружности ведущего колеса, мм;

b – ширина венца зубчатого колеса, мм;

K_3 – $145 \cdot 10^2$ мПа

Податливость шпоночных и шлицевых соединений, град/ Н·мм,

$$e = \frac{\varphi}{T} = \frac{1}{d^2 \cdot l \cdot h \cdot z}$$

где d – диаметр вала, мм; l – длина вала, мм; h – высота шпонки (шлица), мм;

z - . число шпонок (шлицев).

$$K_{ш} = \begin{cases} 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{Н} - \text{для призматических шпонок} \\ 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{Н} - \text{для сегментных шпонок} \\ 4 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{Н} - \text{для шлицевых шпонок} \end{cases}$$

Податливость стержня при растяжении и сжатии, мм/Н:

$$l = \frac{\Delta l}{F} = \frac{1}{E \cdot A},$$

где Δl – деформации стержня, мм; F – внешняя осевая сила, Н; l – длина стержня, мм; E – модуль упругости первого рода материала стержня, мПа; A – площадь поперечного сечения стержня, мм².

Податливость резьбового соединения, мм/Н:

$$l = \frac{\Delta l}{F} = \frac{K_p}{A},$$

где A – площадь витка резьбы, мм².

$$A = \frac{\pi}{4}(D_n^2 - d_b^2),$$

где D_n – наружный диаметр резьбы, мм;

d_b – внутренний диаметр резьбы, мм;

$K_p = (0,5 \dots 1) \cdot 10^{-3}$ мм³/Н для стали

Податливость столба жидкости, мм/Н:

$$l = \frac{\Delta h}{F} = \frac{h}{A \cdot P},$$

где Δh – деформация столба жидкости, мм;

F – внешняя осевая сила, Н;

h – высота столба жидкости, мм;

A – площадь поперечного сечения столба жидкости, мм²;

P – давление столба жидкости, мПа.

При нагружении исполнительного устройства привода его звенья упруго деформируются. Это вызывает погрешность в позиционировании рабочего органа машины.

Для определения линейных и угловых деформаций постоянного или переменного сечения в общем случае нагружения можно использовать формулу Мора:

$$\delta_{k_j} = \sum_{j=1}^n \int_1 \frac{M_{xFj} \cdot M_{xij}}{E_j J_{xj}} dz + \sum_{j=1}^n \int_1 \frac{M_{yFj} \cdot M_{yij}}{E_j J_{yj}} dz + \sum_{j=1}^n \int_1 \frac{M_{zFj} \cdot M_{zij}}{G_j J_{kj}} dz + \sum_{j=1}^n \int_1 \frac{N_{zFj} \cdot N_{zij}}{E_j A_j} dz +$$

$$+ \sum_{j=1}^n K_x \int_1 \frac{Q_{xFj} \cdot Q_{xij}}{G_j A_j} dz + \sum_{j=1}^n K_y \int_1 \frac{Q_{yFj} \cdot Q_{yij}}{G_j A_j} dz$$

M_{xF} , M_{yF} , M_{zF} и M_{x1} , M_{y1} , M_{z1} – аналитические выражения изгибающих моментов соответственно от внешней нагрузки и единичной силы или единичного момента;

N_{zF} и N_{z1} – аналитические выражения нормальных сил соответственно от внешней нагрузки и единичной силы;

Q_{xF} , Q_{yF} и Q_{x1} , Q_{y1} – аналитические выражения поперечных сил соответственно от внешней нагрузки и единичной силы (момента);

EJ_x , EJ_y , GJ_k , EA – жесткость поперечного сечения звена при изгибе в двух плоскостях, кручении, растяжении (сжатии) и сдвиге;

E – модуль упругости первого рода материала звена;

G – модуль упругости второго рода материала звена;

J_x , J_y , J_k – осевые моменты инерции поперечного сечения звена при изгибе и кручении соответственно;

A – площадь поперечного сечения звена;

K_x и K_y – коэффициенты, зависящие от формы поперечного сечения звена.

Для сплошного круглого сечения $K_x=K_y=1,1$; для прямоугольного сечения $K_x=K_y=1,2$; для тонкостенного круглого профиля $K_x=K_y=2$; для двутавров $K_x=K_y=2-2,4$.

В практических расчетах приводов машин можно пренебречь влиянием нормальных и поперечных сил (ввиду малости). Тогда формула Мора значительно упрощается (на половину слагаемых).

Изменение обобщенной координаты звена равно

$$\Delta \varphi_j = \frac{60 \delta_{kj}}{l_j},$$

где δ_{kj} – линейная деформация (перемещение конечной точки) j -го звена;

l_j – длина j -го звена.

Поскольку системы приводов машин работают в реверсивном режиме, то для них имеет значение ошибка перемещения, называемая ошибкой мертвого хода. Она возникает при применении направления движения звеньев вследствие наличия зазоров в кинематических парах функциональных звеньев исполнительного устройства. Влияние этих зазоров мы рассматриваем как ошибки ввода обобщенных координат (передаточных функций).

Из-за наличия ошибок передаточных функций, скорости и ускорения звеньев действительного и теоретического исполнительного устройства имеют незначительные ошибки, приводящие к возникновению дополнительных сил инерции и реактивных сил в кинематических парах.

Движение реального механизма всегда отличается от движения теоретического (идеального) механизма. Это характерно и для исполнительных устройств рабочих органов машин.

При выполнении технологической операции действительное движение рабочего органа отличается от расчетного. Его положение, скорость и ускорение в любой точке реализуемой им траектории в общем случае могут не совпадать с расчетными. Разность между действительным и расчетным положениями рабочего органа называют погрешностью позиционирования исполнительного устройства машины. Разности между его действительными и расчетными скоростями и ускорениями предоставляют собой кинематические погрешности, значения которых влияют на устойчивость параметров привода машины.

Одной из основных причин возникновения погрешностей позиционирования являются технологические погрешности изготовления звеньев (первичные ошибки) исполнительного устройства системы привода машины.

В результате этих погрешностей фактические размеры звеньев навесной системы, определяющих положение рабочего органа в пространстве, отличаются от идеальных, на основании которых составлены

расчетные алгоритмы, и действительное положение рабочего органа отличается от расчетного.

Существенное влияние на возникновение отклонений движения рабочего органа от расчетного оказывают упругие свойства функциональных звеньев и механизмов приводов исполнительного устройства гидропривода.

Так же влияние на выходную точность исполнительного устройства гидропривода оказывают зазоры и люфты в кинематических парах. Они вносят дополнительно малые подвижности в систему, сообщают ей двигательную избыточность.

Уравнение кривой нормального распределения первичных ошибок

$$y = P(x) = \frac{1}{G\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2G^2}},$$

где $y = P(x)$ – ордината кривой Гаусса (плотность вероятности); $e=2,718$ – основание натурального логарифма; a – параметр, равный расстоянию от оси y до максимальной ординаты.

Этот параметр равен математическому ожиданию случайной величины $M(x)$, т.е.

$$a = M(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xP(x)dx$$

или приближенно

$$a = M(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

где X – случайная величина;

X_i – значение i -й случайной величины;

n – число случайных величин.

Математическое ожидание можно рассматривать как размер, на который настраивают рабочий орган машины, т.е. номинальный размер.

Под влиянием систематических ошибок величина математического ожидания может изменяться, что приведет к перемещению кривой нормального распределения вдоль оси x .

G – среднее квадратическое отклонение случайной величины, характеризующее рассеяние значений случайной величины относительно центра группирования.

$$G = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} [x - M(X)]^2 P(x) dx}$$

Вероятность попадания случайной величины в любой интересующий нас интервал (x_1, x_2) можно вычислить с помощью функции Лапласа:

$$\begin{aligned} P(x_1 \leq x < x_2) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_2} e^{-\frac{z^2}{2}} dz - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_1} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \Phi(z_2) - \Phi(z_1) = \\ &= \Phi(z_2) - \Phi(z_1) = \Phi\left[\frac{x_2 - a}{\sigma}\right] - \Phi\left[\frac{x_1 - a}{\sigma}\right], \end{aligned}$$

где $z_2 = \frac{x_2 - a}{\sigma}$; $z_1 = \frac{x_1 - a}{\sigma}$;

$\Phi(z)$ - нормированная функция Лапласа:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

Выражение $e^{-\frac{z^2}{2}}$ в элементарных функциях не интегрируется, поэтому можно считать, что:

при $z = 1.0 - 1.9$	$\Phi(z) = 0.34 - 0.47$
$z = 2.0 - 2.9$	$\Phi(z) = 0.48 - 0.49$
$z = 3.0 - 3.9$	$\Phi(z) = 0.489 - 0.499$

10.2. Технологические способы повышения износостойкости

10.2.1. Применения лазерных установок в трибологии

Слово «лазер» (laser) образовано из первых букв слов «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» - «усиление света путем вынужденного излучения». Основы лазерной технологии изложил Эйнштейн ещё в 1917 году в статьях, посвященных оптическим спектрам атомов и молекул. В них он впервые высказал мысль, что спектры излучения могут иметь двойственную природу: они вызываются спонтанными явлениями и явлениями вынужденного (индуцированного) возбуждения.

Спонтанные явления происходят в среде с равновесными (больцмановскими) заселенностями энергетических уровней, а индуцированные должны возникать в средах с неравновесными заселенностями.

Чтобы получить индуцированное излучение необходимо наличие как минимум двух условий: среды с заметно неравновесным распределением энергетических уровней и сильного источника энергии накачки.

Лазерное излучение в инфракрасном диапазоне, сфокусированное в пятно диаметром порядка десятка микрометров, совершает пилообразное движение (сканирование) по поверхности детали, покрывая весь выделенный под закалку участок. Скорость нагрева микрообъемов детали, взаимодействующих с лучом, и последующего охлаждения достигает 10^6 К/с. Это обеспечивает закалку поверхностного слоя, глубина которого регулируется за счет изменения скорости сканирования. Сканирование производится путем перемещения детали по заданной программе специальными механическими устройствами. Используются как твердотельные лазеры, работающие в импульсном режиме, так и газовые с непрерывным процессом излучения. Лазерная закалка обеспечивает получение однородной мелкокристаллической поверхностной структуры, обладающей повышенной твердостью и износостойкостью. После термообработки лазерным лучом не происходит коробление элементов рельефа детали, не наблюдается заметное ухудшение качества поверхности. Из-за высокой стоимости процесса лазерной закалке подвергаются самые дорогостоящие и ответственные детали, например коленчатые валы ДВС.

Эффективным методом повышения износостойкости деталей является лазерное легирование с одновременной закалкой поверхностного слоя. Поверхность, подлежащая обработке, покрывается тонким слоем вещества,

содержащего легирующие элементы. Так же, как и при лазерной закалке, луч сканирует по поверхности детали. Однако режим сканирования подбирается таким, чтобы температура в микрообъемах поверхности обеспечивала плавление. Таким образом проплавляется весь поверхностный слой. В процессе плавления легирующие элементы внедряются в кристаллическую решетку материала детали. Замечательным является то, что из-за высокой скорости нагрева и последующего охлаждения, помимо твердых растворов легирующих элементов, в материале детали возникают метастабильные структуры с избыточным по сравнению с твердым раствором содержанием легирующего элемента. Таким образом, возникает возможность внедрения в кристаллическую решетку даже такого элемента, с которым вещество детали вообще не может образовать твердого раствора. Такие метастабильные структуры, будучи прочно связаны с основой, обладая при этом сверхвысокой твердостью, обеспечивают резкое повышение износостойкости.

В качестве примера приведем способ резкого упрочнения алюминиевых сплавов. Упрочняющим элементом преимущественно является кремний. Для образования твердого раствора в алюминий можно вводить не более 12% кремния. Избыточный кремний выпадает в виде крупных вкраплений и не вызывает роста твердости материала. Лазерный метод позволяет вводить в алюминий до 40% кремния и выше. Избыточный кремний образует мелкодисперсную равномерно распределенную в объеме фазу, резко упрочняющую материал. При этом твердость поверхностного слоя становится сравнима с твердостью закаленной стали. Одновременно снижается свойственная алюминию адгезионная активность и резко улучшаются эксплуатационные свойства деталей из алюминиевых сплавов. Таким способом повышают износостойкость поршней ДВС, цилиндрических гильз.

В настоящее время с целью обеспечения высокой износостойкости узлов трения получены следующие параметры лазеров: плотность мощности лазерного излучения 10^{20} - 10^{21} Вт/см², напряженность электрического поля 10^{12} В/см, нагрев вещества до 120 млн. градусов.

Переход атомов и молекул с одного энергетического уровня на другой можно вызвать различными способами, например оптическим излучением, электрическим разрядом и т.д. На рисунке (10.6) представлена схема различных квантовых переходов под воздействием оптического излучения на атом, имеющий два энергетических состояния (двухуровневая система). Эта схема позволяет упрощенно представить основные процессы получения лазерного излучения.

Если атом с энергией E_1 (в обычных условиях система, состоящая из двухуровневых атомов, находится в состоянии с наименьшим запасом энергии) взаимодействует с пролетающим фотоном с энергией $\varepsilon_{1,2}=E_2-E_1$, то поглощение фотона переводит атом на верхний энергетический уровень E_2 . Это элементарный акт инвертирования энергетического состояния атома. В случае, когда число атомов с заселенными уровнями E_2 превысит число

атомов с заселенными нижними уровнями $n_2(E_2) > n_1(E_1)$, такая система называется инвертированной активной средой. В этой среде возможен самопроизвольный переход электрона с уровня E_2 на уровень E_1 . Такой процесс называется спонтанным, энергия родившегося фотона $\varepsilon_{1,2} = E_2 - E_1$, а остальные характеристики (импульс, поляризации) будут произвольными, то есть излучение не когерентно. Подобное излучение получило название «люминесценция».

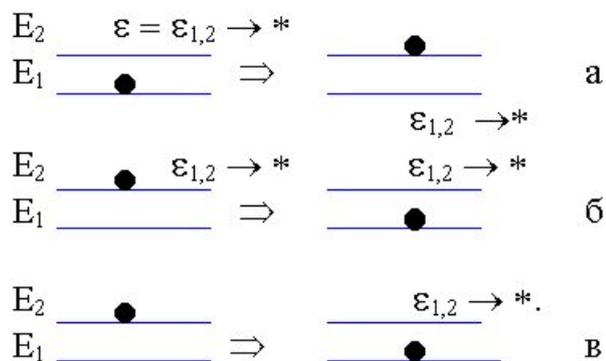


Рис. 10.6. Схема квантовых переходов в веществе, процессов испускания и поглощения света а- поглощение; б- вынужденное испускание; в- спонтанное испускание.

В интенсивной активной среде всегда возникают многочисленные акты люминесценции. Образовавшиеся фотоны в свою очередь вызывают сверх люминесценцию, которая имеет короткие дуги, и если их импульс не направлен вдоль резонирующей системы (Рис.10.7), то они быстро затухают.

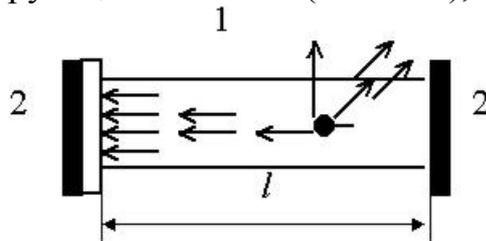


Рис.10.7 Активная среда в оптическом резонаторе.

1- инвертированная активная среда; 2- элементы зеркала резонатора.

Фотоны с энергией $\varepsilon_{1,2}$, спонтанно испущенные вдоль оси резонатора, многократно отражаясь от зеркал, инициируют переходы $E_2 - E_1$ практически сразу во всех инвертируемых атомах, вызывая целую лавину вторичных фотонов, то есть формируют лазерное излучение. Элементарный акт излучения показан на рис. 10.7. При этом все параметры фотонов будут аналогичны первичному фотону, а длины их волн будут соответствовать нормальным колебаниям резонатора- модам. Этот процесс называется - вынужденным (индуцированным) испусканием света, а само излучение будет когерентным.

Дальнейшим этапом развития принципа усиления, света является поиск атомных (молекулярных) систем, в которых бы имелись требуемые энергетические уровни и были возможны условия для соответствующих

переходов. Одним из первых материалов с, такими свойствами стал искусственный, рубин (кристалл оксида алюминия, легированный хромом). Материал для лазера должен обеспечивать так называемую инверсию населенностей энергетических уровней, т. е. такое состояние системы, когда большая часть электронов (атомов, молекул) находится на верхних энергетических уровнях, с которых начинается флюоресцентный переход, а меньшая — находится на нижних уровнях, на которых переход завершается. Для создания инверсии нужно изменить тепловое равновесие системы. Создать инверсию в системе, содержащей только два уровня, с помощью оптической накачки (облучения системы дополнительным светом) невозможно. Поэтому используют системы с тремя или четырьмя уровнями.

10.2.2. Свойства лазерного излучения

Лазерное излучение имеет волну со строго определенной длиной λ и частотой f , плоским фронтом и она является поляризованной. Реальная световая волна представляет собой, в отличие от лазерной, набор плоских монохроматических поляризованных волн с разной f , с разными направлениями распространения и плоскостями поляризации. В идеальном лазерном излучении весь набор состоит из единственной волны. В реальном лазерном излучении содержится некоторое количество мод-волн с разной частотой, причем максимальной интенсивностью будут обладать моды, для которых выполняется условие возникновения стоячих волн и направление выдержано строго вдоль оси резонатора, то есть это те моды, λ которых совпадает с вершиной спектральной линии активной среды. (рис.10.8)

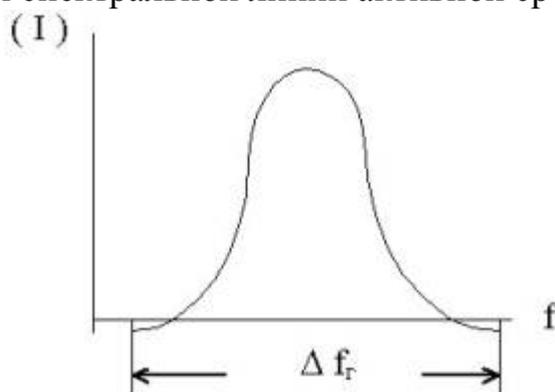


Рис. 10.8. Спектральная линия активной среды (линия генерации) и моды оптического резонатора.

Лазерное излучение обладает монохроматичностью, направленностью (малой расходимостью), высокой яркостью и мощностью.

Монохроматичность излучения определяется тем диапазоном, который занимает излучение в спектральном интервале и определяется техническими флуктуациями длины резонатора, но даже если удастся устранить эти флуктуации, то все равно ширина линии генерации Δf_r не будет бесконечно узкой, так как всегда присутствует вклад спонтанного излучения в лазерную моду. Оценки, приведенные в ряде работ, показывают, что предельная монохроматичность, например, для лазера с активной средой

He-Ne может составлять $\Delta f_r / f_r = 10^{-17}$ однако экспериментально достигнутая величина равна 10^{-15} .

Монохроматичность позволяет сфокусировать лазерное излучение на поверхности обрабатываемого материала с помощью несложной оптической системы. На рис.10.9 показаны механизмы фокусирования монохроматического и немонахроматического (белого) излучений. Из рисунка видно, что линейные размеры сфокусированного луча d_r могут достигать малых размеров ($= 0,01 - 0,0005$ мм) для монохроматического и сравнительно больших для белого излучения ($d_b > 2 - 3$ мм), так как излучение, состоящее из набора отдельных волн, проходя через фокусирующую систему, не может быть сведено в пятно малого размера.

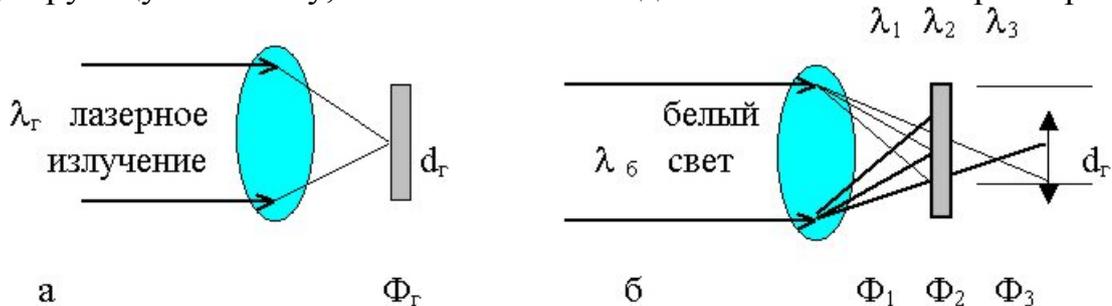


Рис.10.9. Принципы фокусирования монохроматического – б и немонахроматического (белого) излучения – а.

Высокая направленность лазерного излучения объясняется тем, что в резонаторе возбуждаются лишь моды, которые параллельны или почти параллельны оси резонатора. Однако даже для полностью когерентного излучения расходимость лазера будет иметь конечную величину, определяемую явлением дифракции света. Если диаметр пучка d_0 , то расходимости излучения получено выражение

$$\theta_d = k_1(\lambda/d_0) \text{ (рад)} \quad (10.14)$$

где k_1 - распределение интенсивности по сечению пучка (для однородного пучка $k_1 = 1,22$, для гауссовских пучков $k_1 = 2/\pi$, d_0 - диаметр пучка излучения. Отметим, что выражение (10.14) справедливо лишь для пучков, обладающих полной пространственной когерентностью, и называется дифракционно-ограниченной направленностью. Если излучение имеет частичную пространственную когерентность, то ее расходимость будет больше, чем расходимость, обусловленная только дифракцией, и описывается выражением

$$\theta_c = k_1(\lambda/[S_k]^{1/2}) \quad (10.15)$$

где S_k - область когерентности.

Расходимость излучения уменьшается при его телескопическом расширении до величины

$$\theta_r = \theta_d(d_0/d_0^r) \quad (10.16)$$

где d_0 и d_0^r - исходный и конечный диаметры пучков. В качестве примера приведем данные по θ для некоторых типов лазеров (табл. 10.2).

Таблица 10.2.

Тип лазеров	θ , рад
Газовые непрерывные с телескопическим расширением	$10^{-5}-10^{-6}$
Газовые непрерывные	$10^{-3}-10^{-4}$
Твердотельные импульсные	10^{-2}
Полупроводниковые	10^{-1}

Следствием малой расходимости лазерного пучка является его высокая яркость.

Под яркостью источника понимают мощность излучения с единицы поверхности в единичный телескопический угол. В силу малой расходимости лазерного пучка энергия излучения переносится в данном направлении с небольшими потерями, определяемыми θ . Кроме того, яркость находится в прямой зависимости от мощности излучателя. Как правило, мощность лазеров имеет величину от 10 до 100 кВт. Чтобы получить такую мощность когерентного (монохроматического) излучения путем разогрева тела, последнее должно иметь температуру порядка 10^{13} К. Поэтому яркость даже маломощных газовых лазеров на много порядков превышает яркость Солнца, равную $130 \text{ Вт/см}^2 \text{ ср}$, а яркость мощных твердотельных лазеров составляет величину $\approx 10^{17} \text{ Вт/см}^2 \text{ ср}$.

10.2.3. Методы генерации лазерных импульсов

Свойство лазеров генерировать импульсы малой длины, подразумевает концентрацию энергии во времени и в некотором смысле аналогично свойству монохроматичности, означающему концентрацию энергии в узком диапазоне длин волн. Однако генерация коротких импульсов является менее фундаментальным свойством, чем монохроматичность. Хотя любой лазер можно в принципе изготовить таким, что он будет генерировать достаточно монохроматическое излучение, тем не менее, для этого наилучшим образом подходят только газовые лазеры, обладающие узкими линиями генерации $\Delta\lambda_r$ длительностью импульса τ_i примерно 0,1- 1 нс. И все-таки такие импульсы не рассматриваются как очень короткие, поскольку даже некоторые лампы-вспышки способны излучать импульсы длительностью менее 1 нс. Для создания же сверхкоротких импульсов применяются твердотельные или жидкостные лазеры, наоборот, с широкой линией излучения, а для укорочения импульса используется специально разработанный метод синхронизации мод, с помощью которого можно получать импульсы света с длительностью, приблизительно обратно пропорциональной ширине линии генерации. Длительность импульсов, обработанных методом синхронизации мод, может иметь величину от 1 пс до 30 фс.

Описанный выше способ лазерной генерации носит название "режим свободной

генерации" (РСГ). Его особенностью является свободный выход излучения из резонатора по мере накопления цуга волн достаточной мощности (моды). При этом за время вспышки

лампы накачки, дающей оптическое излучение, необходимое для инвертирования активной среды ($\tau_{\text{ил}} = 10^{-3}$ с.), сможет образоваться до сотни мод (см. рис. 10.10, а).

Режим генерации с задержкой излучения называется режимом модулированной добротности (РМД).

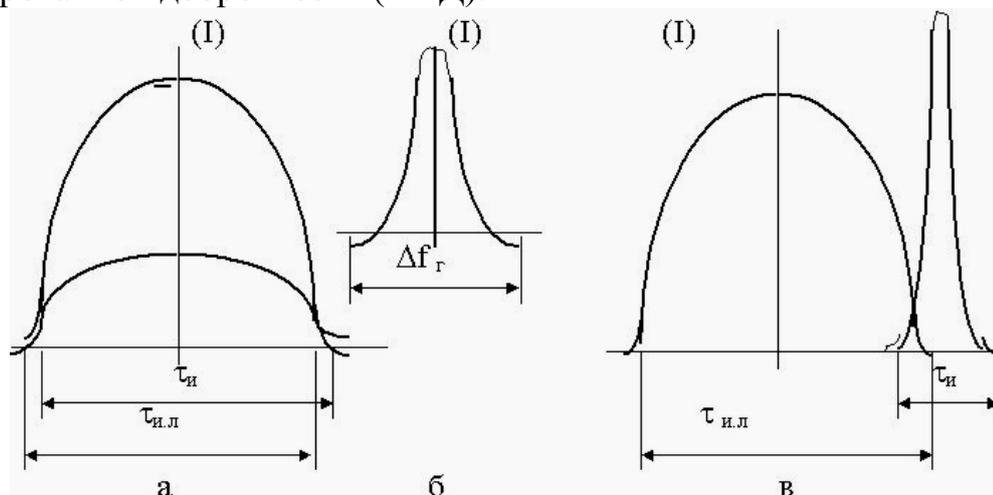


Рис.10.10. Режимы лазерной генерации :
 а- режим свободной генерации (РСГ); б- частотная структура каждой отдельной моды;
 в- режим модуляции добротности (РМД).

Метод модуляции добротности резонатора позволяет получать лазерную генерацию в любых типах лазеров в виде коротких импульсов с длительностью 10^{-5} - 10^{-9} с с высокой пиковой мощностью в диапазоне 10^5 - 10^{10} Вт. Принцип работы лазера в режиме модуляции добротности состоит в следующем. В резонатор лазера помещается оптический элемент, обладающий способностью изменять пропускание излучения данного лазера (затвор). Если затвор закрыт, то генерация не возникает и инверсия населенности может стать очень большой. При открывании затвора усиление в лазере будет значительно превышать потери, и накопленная в активной среде энергия выделится в виде короткого и интенсивного импульса, названного гигантским, у которого длительность будет на 5-6 порядков меньше длительности импульса РСГ (рис. 10.10,а).

Модуляция добротности может осуществляться акустическим или электрооптическим путем.

Акустооптический модулятор (АОМ) представляет собой оптически прозрачное вещество, в котором с помощью пьезоэлектрического преобразователя возбуждается ультразвуковая волна. Наличие волны приводит к тому, что вещество работает как фазовая решетка. При помещении ячейки в резонатор и приложении напряжения к преобразователю часть лазерного излучения будет дифрагировать на индуцированной фазовой решетке и выходить из резонатора. Если напряжение сделать достаточно большим, то потери могут привести к срыву генерации. Затем, снимая напряжение, мы можем получить короткий и мощный импульс.

Для CO_2 -лазеров в качестве АОМ используют кристалл Ge. Заметим, что выпускаемые в данное время АОМ рассчитаны на среднюю мощность

лазерного излучения не более 100 Вт вследствие поглощения части излучения в веществе и невысокой лучевой прочности материала АОМ. При помощи АОМ можно получить частоту следования импульсов 100 кГц, 200 кГц и даже 550 кГц.

В СО₂-лазерах в качестве ЭОМ используется кристалл CdTe. С его помощью можно получить импульсы длительностью от нескольких наносекунд до 300 нс. Так, в работе с помощью такого кристалла были получены импульсы длительностью 140 нс. Недостатком кристалла CdTe можно назвать его очень сильную чувствительность к повреждениям и маленькую лучевую стойкость. Однако в начале 2002 г. фирма Coherent заявила о выпуске первых технологических волноводных ВЧ-накачиваемых СО₂-лазеров с внутренней модуляцией добротности. Средняя мощность одного из них превышает 15 Вт. Мощность в импульсе превышает 2.5 кВт. Мощность второго также превышает 15 Вт, а мощность в импульсе превышает 15 кВт. Длительность импульса в обоих случаях при этом менее 150 нс.

10.2.4. Характеристики лазерного излучения

Основными параметрами лазерного излучения для импульсных лазеров являются: E —энергия импульсов, Дж; τ — длительность импульса, с; f — частота следования импульсов, Гц; $P_{п}$ — пиковая мощность, Вт; $P_{ср}$ — средняя мощность (также для непрерывного излучения), Вт.

Частота следования импульсов

$$f = \frac{1}{T}, \quad (10.17)$$

где T — период следования импульсов.

Энергия импульсов

$$E = \int_0^{\tau} P(t) dt \quad (10.18)$$

где $P(t)$ —текущее значение мощности излучения.

Плотность излучения является главным технологическим параметром и принимается равной

$$q = \frac{E}{F\tau}, \quad (10.19)$$

где F – площадь пятна фокусирования.

Для непрерывного излучения

$$q = \frac{P_{ср}}{S}. \quad (10.20)$$

В настоящее время достигнута плотность излучения $q = 10^{14}—10^{16}$ Вт/см² (для сравнения на Солнце $q = 10^8$ Вт/см²).

Энергия и мощность лазерного излучения, впрочем как и другие его характеристики, определяются свойствами активной среды и параметрами резонатора. С учетом эффекта насыщения для интенсивности генерации I_r выражение имеет вид

$$E_r = E_H [(q_H l)^{1/1} - Q^{1/2}]^2, \quad (10.21)$$

где E_H – интенсивность насыщения (интенсивность, при которой коэффициент усиления уменьшается вдвое по сравнению с ненасыщенным значением коэффициента); q_H – ненасыщенный коэффициент усиления, Q – потери в резонаторе за один проход; l – длина активной среды.

Если усиление на проход значительно больше потерь, то (10.21) записывается как

$$E_r = E_H q_H l,$$

В принципе q_H и E_H для различных лазеров меняется в широких пределах и это определяет широкий диапазон изменения мощности для них. Так для газовых лазеров работающих в непрерывном режиме, достигнут уровень мощности в десятки киловатт. Для импульсных лазерных систем мощность определяется, как энергетическим, так и временными характеристиками.

$$W_{и} = E_{и} / \tau_{и},$$

где $W_{и}$ – мощность, Вт; $E_{и}$ – энергия, Дж; $\tau_{и} \approx 10^{-8}$ с.

По этому пиковая мощность импульсных лазерных установок с твердотельной активной средой в режиме (РМД) достигает значений $\sim 10^{12}$ – 10^{13} Вт за счет очень коротких импульсов. Большой прогресс за последние годы достигнут в укорочении длительности импульса генерации.

Большинство приложений лазеров обусловлено возможностью концентрировать гигантскую мощность излучения на малую площадь (размером до микрона). Плотность мощности лазерного излучения существенно повышают фокусировкой излучения с помощью оптических систем пятно малого, но конечного размера. Поскольку расходимость излучения увеличивается за счет явления дифракции, то минимальный размер пятна d_r в фокусе линзы равен

$$d_r = \theta \Phi, \quad (10.22)$$

где Φ – фокусное расстояние линзы.

Учитывая (10.22) получим, что минимальный размер пятна в фокусе линзы $\sim \lambda$. Аберрации оптической системы приводят к увеличению размера пятна примерно на порядок. Для многих случаев промышленных применений $d_r \approx 10^2$ – 10^3 мкм, то есть при таких размерах удельная мощность (плотность) современных твердотельных лазеров может достигать $\sim 10^{17}$ Вт/см². Для сравнения, Солнце выделяет $\sim 7 \cdot 10^3$ Вт с каждого сантиметра поверхности, а если взять излучения с одной длиной волны, то эта мощность не превысит сотых долей ватта.

Диапазон параметров современных лазеров лежит в следующих пределах: λ (мкм) 0,3—10,6; E (Дж) 0,1–1000; τ (с) 10^{-3} — 10^{-9} (10^{-12}); f (кГц) 0,1—1000; P_n (Вт) до 10^{13} ; P_{cp} (кВт) до 200 (400); q (Вт/см²) до 10^{16} .

10.2.5. Взаимодействие лазерного излучения с обрабатываемыми материалами

При лазерном облучении материалов происходит поглощение, рассеивание и отражение световой энергии. Поглощение энергии приводит к нагреву обрабатываемых материалов. Отражение света может быть весьма существенным.

Таблица 10.3.

Коэффициенты отражения лазерного излучения

Характеристика лазера		R металла			
Активное вещество	λ , мкм	Au	Cr	Ag	Ni
Ag	0,488	0,415	0,437	0,952	0,597
Рубин	0,694	0,930	0,831	0,961	0,676
ИАГ	1,064	0,981	0,901	0,964	0,741
CO ₂	10,600	0,975	0,984	0,989	0,942

Интенсивность отражения энергии определяется значением коэффициента отражения R , который зависит от рода материала и длины волны излучения (табл. 10.3). Высокий коэффициент отражения имеют металлы при воздействии излучением CO₂-лазеров с длиной волны $\lambda=10,6$ мкм.

Изменение температуры в пределах тонкого диффузионного слоя поверхности описывается уравнением

$$T = (1-R)J\tau/[c\rho(2D\tau)^{1/2}], \quad (10.23)$$

где R -отражательная способность поверхности; J -начальная интенсивность излучения; τ -длительность импульса;

$$D = k/i, \quad (10.24)$$

где k , c и ρ соответственно теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность материала.

Важным фактором, влияющим на отражение, является состояние поверхности металла: наличие оксидной пленки, степень шероховатости, использование поглощающих покрытий. Так, коэффициент поглощения инфракрасного излучения с длиной волны $\lambda=10,6$ мкм окисленной поверхности возрастает в несколько раз. Увеличение шероховатости от 34 до 120 мкм приводит к увеличению коэффициента поглощения инфракрасного излучения в 1,2—1,5 раза для коррозионно-стойкой стали и в 2,5—2,8 раза — для технического железа.

Использование различных поглощающих покрытий существенно увеличивает эффективность лазерной обработки. Состав покрытия должен быть простым в изготовлении, недорогим, легко наносимым на поверхность с обеспечением высокой адгезионной схватываемости с металлом, безвредности и стабильности при длительном хранении; должен обладать достаточно высокими температурами плавления и испарения, а также высокой теплопроводностью для обеспечения подвода энергии к обрабатываемому металлу. Наибольшее применение находят следующие типы покрытий:

- химические покрытия: фосфатирование марганцем или цинком, сульфидирование, оксидирование и др.;
- красящие составы, содержащие оксиды металлов Al, Zn и др.;
- напыленные оксиды различных металлов;
- сажа, получаемая на поверхности при сжигании резины, масел и т. д.

Толщина углеродного и оксидного покрытий 10— 60 мкм, химических покрытий —2—10 мкм.

10.2.6. Лазерная наплавка порошка на железной основе

Стоимость традиционных порошков на никелевой и кобальтовой основе для изготовления твердых износостойких покрытий при ремонте и упрочнении деталей в последние годы существенно возросла (табл.10.4), что заставляет искать альтернативные материалы покрытий и технологии их нанесения

Таблица 10.4

Ориентировочная стоимость порошков для наплавки с целью упрочнения

Обозначение порошка	Производитель	Назначение	Стоимость долл. США за кг.
Серия Eutalloy RW	Castolin, Eutectic, Германия	Для твердых покрытий	90-180
Серия ПР-НХ17 СР3-СР4	ОАО «Полема», г. Тула, Россия	Для износостойких покрытий	50-70
Сферокорд HR	ООО «СП-Техникорд», Россия	Для износостойких покрытий	60
ПГ-10Н-01 ПГ-12Н-02	Торезский завод наплавочных твердых сплавов, Украина	Для твердых покрытий	70

Значительный интерес представляет использование порошковых систем на железной основе, полученных методом механического синтеза в атритторах. В этом случае материалы, обладая существенно более низкой стоимостью, до 30 дол. США за 1 кг, в исходном состоянии имеют в своем составе аморфные фазовые включения.

Степень аморфизации обусловлена составом исходной порошковой шихты, условиями и временем механосинтеза и может достигать 85-90%.

Получение лазерных слоев с аморфной или нанокристаллической структурой представляется одной из возможностей реализации возросших требований к свойствам покрытий.

Существует достаточное количество данных, подтверждающих более высокие значения твердости и износостойкости покрытий с нанокристаллической структурой по сравнению со свойствами покрытий

того же состава, но с кристаллической структурой. Особенно интересны данные, относящиеся к свойствам покрытий, полученных при кристаллизации аморфных или смеси аморфных и кристаллических фаз.

Чтобы избежать трещинообразования при многослойной наплавке, следует ограничивать конечную толщину слоя не более 2 мм.

Для ремонта и упрочнения изделий в машиностроении можно, например, рекомендовать порошковый состав аморфизирующегося самофлюсирующегося сплава системы Fe-Ni-Cr-Si-B-Co-Mo, обеспечивающего наибольшее содержание аморфной фазы в составе слоя и получение высоких механических свойств.

10.2.7. Возможности лазерного зажигания топливных смесей.

Диаметр фокального пятна (диск Эйри) при фокусировке лазерного пучка ограничивается дифракцией Фраунгофера и описывается следующим выражением:

$$D_{\min} \cong 4\lambda \left(\frac{F}{\phi} \right) / \pi, \quad (10.25)$$

где

F — фокальная длина линзы;

ϕ — диаметр лазерного пучка, (если он меньше диаметра линзы).

Образование лазерной плазмы сопровождается ярким свечением широкого спектрального состава, звуковой ударной волной, что указывает на высокую температуру плазменного сгустка и на возможность инициирования поджига топливных смесей и взрывных материалов.

Свеча как основной элемент искрового зажигания вообще устраняется из области горения.

Лазер может обеспечить необходимую лучевую энергию для воспламенения и обедненных смесей без снижения КПД и мощности двигателя.

Лазерный пробой воздуха происходит, когда интенсивность, в фокусе линзы достигает значения около 100 мВт/см^2 , при напряженности электрического поля $\approx 2 \cdot 10^6 \text{ в/см}$. Пробой имеет порог по напряженности

электрического поля $E_{\text{пор}} = \left(4\pi I_{\text{пор}} / c \right)^{0.5}$, определяемый через интенсивность света.

В случае лазерного пробоя кратковременным излучением $\approx 10 \text{ нс}$ появление свободных электронов в ограниченном фокальном объеме ($\approx 10^{-5} \text{ см}^3$) практически исключено.

Вероятность ω одновременного поглощения n квантов пропорциональна n – ой степени интенсивности:

$$\omega = A I^{n_t} \quad (10.26)$$

Вероятность ионизации резко возрастает, если энергия возбуждения одного из промежуточных состояний близка к энергии целого числа квантов (промежуточный многофотонный резонанс).

Количество электронов возрастает по экспоненциальному закону:

$$N_t = N_0 e^{\gamma t} \quad (10.27)$$

где

$\gamma = \left(\frac{I}{\tau}\right) \ln 2$ — постоянная развития лавины;

τ — время удвоения числа электронов.

В отличие от детонации (ударная волна звука) скорость движения фронта горения невелика (10^{-3} - 10 м/с).

Скорость горения $U \sim \left(\frac{\chi}{\tau}\right)^{0.5}$,

где

χ, τ — коэффициент теплопроводности и характеристическое время его реакции в

зоне горения.

Уровень пиковой мощности и энергия в импульсе излучения при выбранной длине волны, необходимые для зажигания выбранного топлива при частотах повторения 20 – 100 гц определяются характеристиками двигателя. Осложнения, вызываемые перегревом диодного лазера, заставили Германскую фирму CRT на втором этапе использовать миниатюрный Nd^{3+} : АИГ лазер с пассивной модуляцией добротности с накачкой от одного инжекционного лазера. Технологическим отличием инжекционных лазеров (ИЛ) от газовых и твердотельных является то, что их изготовление происходит с участием высоких технологий. Типичные диодные ИЛ имеют резонатор, образованный многослойными диэлектрическими зеркалами на торцевых гранях монокристалла в направлении, перпендикулярном к рп-переходу.

Для зажигания топливных смесей на основе алканов, пригодны лазеры с длиной волны меньше 950 нм.

Лазерную «свечу» зажигания рекомендуется термоизолировать от корпуса двигателя и вводить оптическое излучение через термостойкое оптическое окно (сапфир, кварц и др.). Это существенно снижает перепад температур, которым будет подвержен лазер, а его удаление с цилиндра, сопровождаемое применением более длиннофокусных линз, можно компенсировать путем увеличения входной мощности.

Параметры коммерческого лазера с пассивной модуляцией добротности и диодной накачкой для зажигания топливных смесей имеют следующие параметры:

Размеры излучателя — $9 \times 26 \times 20$ см;

Длительность импульса — 10 нс;

Энергия в импульсе на частотах 1 кГц — > 100 мкДж.

10.2.8. О формировании наноструктур при лазерном оплавлении

Упорядоченные и неупорядоченные ансамбли наночастиц являются новыми, искусственно созданными материалами, широкий круг применения которых связан с их уникальными свойствами. Поверхности с наноструктурой приводят к улучшению электрических, тепловых и электронно-эмиссионных свойств материалов, повышению

биосовместимости с живыми тканями имплантантов и протезов, применяемых в ортопедии и стоматологии.

Воздействие лазерного импульса определенной плотности энергии и длительности на поверхность твердого тела может приводить к оплавлению поверхностного слоя.

Скорость изменения радиуса r кристаллического зародыша определяется из уравнения:

$$\frac{\partial r}{\partial t} = \nu a \exp\left\langle \frac{U}{kT(t)} \right\rangle \left[1 - \exp\left\langle \frac{\Delta\mu}{kT(t)} \right\rangle \right], \quad (10.28)$$

где ν — дебаевская частота; U — энергия активации перемещения атома;

$T(t)$ — температура расплавленной области, зависящая от времени t ;

k — постоянная Больцмана; $\Delta\mu = \frac{h(T_0 - T)}{T_0}$ — разница химических потенциалов

атомов в переохлажденной жидкости; h — энтальпия фазового

перехода на атом;

T_0 — температура плавления.

Изменение температуры можно выразить линейным законом $T(t) = T_0 - \varepsilon t$, где скорость охлаждения ε известна.

При малых глубинах расплава и небольшом перегреве жидкой фазы $\frac{T_0 - T}{T_0} \ll 1$, возникающих сразу после воздействия лазерного импульса, температуру жидкости можно считать постоянной по глубине.

Размер центра новой фазы при охлаждении расплава со скоростью ε стремится к своему предельному значению

$$r \approx \nu a \exp\left\langle -\frac{U}{kT_0} \right\rangle \frac{kT_0^2}{\varepsilon U} \frac{h}{h+U} \quad (10.29)$$

Если учесть, что время релаксации $\tau_0 = \frac{kT_0^2}{\varepsilon U}$, $U \gg h$, то при скоростях охлаждения

$\varepsilon = (10^6 - 10^8) \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, $\frac{kT_0}{V} \approx 0.1$, $T_0 \approx 2 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{C}$ характерное время процесса составит $\tau_0 = (10^{-4} - 10^{-6}) \text{ с}$.

Асимптотические функции распределения зародышей по размерам $f = \frac{Z}{N}$ (при $\tau = \tau_0 < D$) при значениях параметров $U = 1 \text{ эВ}$, $\frac{h}{V} = 0.1$, $kT_0 = 0.1 \text{ эВ}$,

$\nu = 10^{12} \text{ с}^{-1}$, $\varepsilon \approx 10^7 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ показывают, что средний размер зародышей $r \approx 10 \text{ нм}$.

С уменьшением скорости охлаждения до $10^6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ функция распределения смещается к максимуму в районе 100 нм. При $\varepsilon \approx 10^5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$

среднестатистический размер зародышей достигает 500 нм. Дальнейшее уменьшение скорости приводит к мелкозернистой кристаллической структуре.

10.2.9. Химико-термическая обработка (ХТО)

Целью ХТО является создание на стальной поверхности тонкого легированного слоя за счет диффузии извне легирующих элементов. Затем поверхность подвергается закалке. Поверхностный слой приобретает высокую твердость (до 60 и более единиц по шкале Роквелла). Сюда относятся цементирование, азотирование, борирование, насыщение хромом, никелем, цианирование (насыщение одновременно азотом и углеродом), борохромирование (одновременное насыщение бором и хромом), карбоборирование (одновременное насыщение углеродом и бором) и др.

Толщина упрочненного слоя может превышать 2 мм. Химико-термическая обработка получила наибольшее распространение, как метод упрочнения поверхностей из-за простоты, доступности и высокой эффективности. Так, например, цементация осуществляется в твердом, жидком и газообразном карбюризаторах. В качестве твердого карбюризатора используется древесный уголь. Процесс протекает медленно: скорость науглероживания порядка 0,1 мм/ч. Однако, если повысить температуру до 950÷980°C, процесс существенно ускоряется. В качестве газового карбюризатора используются углеводороды, а жидкого - расплавы солей, содержащих углерод. Наиболее эффективна газовая цементация с нагревом детали токами высокой частоты.

Азотированию подвергаются стальные детали при более низкой, чем при цементировании, температуре: 520÷560°C. Легирующие элементы, входящие в состав стали (Cr, Mo, V, Al), образуют с азотом стойкие нитриды. Наибольшую твердость придает алюминий, однако поверхностный слой приобретает повышенную хрупкость и наблюдается искажение формы изделия. Азотирование придает деталям высокую циклическую прочность и соответственно стойкость против усталостного изнашивания. Поэтому азотированию подвергают коленвалы, цилиндры, поршневые кольца, седла клапанов, зубья шестерен. Ресурс шеек азотированных коленвалов превосходит амортизационный срок двигателя. Кроме износостойкости, азотирование придает деталям и высокую коррозионную стойкость. Износостойкость сохраняется при нагреве до 500÷600 °C (что весьма важно для ДВС), в то время как при нагреве цементированной поверхности выше 225÷275°C, твердость ее, а следовательно и износостойкость снижаются. Недостатком метода является увеличение деталей в размере и коробление. Поэтому азотированные элементы деталей подвергают окончательной обработке в виде полирования или шлифования.

Цианирование (нитроцементация) происходит в жидких (расплавы солей) и газовых азотно-углеродных средах. Низкотемпературное цианирование осуществляется при температуре 530÷650°C, имеет небольшую скорость и применяется для высоколегированных

инструментальных высокоуглеродистых сталей и легированных сталей с содержанием углерода до 0,4%. Обработке подвергаются ответственные резьбовые соединения, втулки, зубчатые колеса, вилки механизма коробки перемены передач, ролики, кулачковые пары. Наиболее гибким процессом является газовое цианирование. Оно поддается автоматизации и позволяет управлять содержанием С и N в отдельности. Преимущество цианирования перед цементированием и азотированием - большая скорость процесса и более высокий упрочняющий эффект.

Аналогична и технология диффузионного насыщения рабочих поверхностей деталей бором, хромом, никелем, серой в отдельности либо в различных комбинациях.

10.2.10. Применение финишной антифрикционной безабразивной обработки поверхностей детали

Износостойкость детали во многом зависит от окончательной (финишной) технологической обработки ее поверхностей. Для широко распространенных сочленений выявлены параметры шероховатости, при которых интенсивность изнашивания минимальна. Установлено, что от финишной обработки деталей зависит не только первоначальная, приработочная, но и последующая интенсивность изнашивания при эксплуатации.

Рассмотрим случай окончательной обработки зеркала цилиндра двигателя внутреннего сгорания, а также шеек коленчатых валов. Зеркало цилиндра обрабатывают методом хонингования. Перед хонингованием цилиндры шлифуют, разворачивают или растачивают. Хонингование проводят в несколько этапов. Этот процесс может обеспечить требуемую шероховатость поверхности цилиндра и направление неровностей под определенным углом к оси цилиндра, что создает наилучшие условия для удержания смазочного материала на зеркале цилиндра. Независимо от вида трения в процессе приработки исходная шероховатость поверхности переходит в эксплуатационную. Во время приработки изменяется и макрогеометрия (волнистость) поверхности.

При хонинговании поверхность в большей или меньшей степени насыщается абразивными частицами. Хотя затем цилиндр двигателя промывают и продувают сжатым воздухом, абразивные частицы все же остаются, главным образом в труднодоступных местах, в стыках неподвижных посадок и т. д. В процессе работы двигателя эти частицы ускоряют изнашивание деталей.

Износ цилиндров и поршневых колец автомобильных двигателей в начальный период их работы (в течение 10—12 ч) составляет приблизительно 5—15% от последующего износа при использовании всего ресурса двигателя.

Потребовался новый технологический процесс окончательной обработки зеркала цилиндра и других поверхностей деталей двигателя, при котором исключалось бы использование абразивов. К такому методу относится финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО), которая позволяет повысить износостойкость зеркала цилиндра примерно в 1,3 раза, резко сократить время приработки и устранить возможность задиров в процессе приработки цилиндропоршневой группы. Сущность ФАБО состоит в том, что поверхности трения деталей покрывают тонким слоем латуни, бронзы или

меди. При этом используют явление переноса металла при трении. Обрабатываемую поверхность обезжиривают, а перед нанесением покрытия покрывают раствором (глицерином или смесью двух частей глицерина и одной части 10%-ного раствора соляной кислоты), который в процессе трения разрыхляет оксидную пленку на поверхности стали, пластифицирует поверхность медного сплава и создает условия для схватывания его со сталью.

Существует принципиальная разница в переносе материала при избирательном переносе (ИП) и при ФАБО. При ИП в случае трения бронзы из ее твердого раствора происходит сепарация атомов меди. Атомы легирующих элементов, растворяясь, переходят в смазочный материал; атомы меди, соединяясь в группы, переходят на сталь. При ФАБО состав перенесенного материала не отличается от исходного. Здесь материал переносится крупинками, которые прочно схватываются со сталью и имеют между собой определенную связь.

Толщина антифрикционного слоя латуни на стали при ФАБО 2—3 мкм, бронзы и меди—1—2 мкм. Шероховатость грубых поверхностей после ФАБО может быть уменьшена. При малых параметрах шероховатости поверхности ($Ra = 0,63 \dots 0,08$ мкм) ФАБО не изменяет их значения. Детали перед ФАБО предварительно подвергают шлифованию, развертыванию, точению или хонингованию. Шероховатость поверхности должна быть не ниже $Ra = 2,5$ мкм.

Преимущества ФАБО по сравнению с другими финишными операциями состоят в том, что метод чрезвычайно прост, не требует сложного оборудования и придает стальной или чугунной поверхности высокие антифрикционные свойства. Обработанный ФАБО цилиндр двигателя как бы превращается в бронзовый, поскольку коэффициент трения снижается в 1,5 раза.

Многие тяжело нагруженные детали разрушаются в результате фреттинг-коррозии в зонах прессовых посадок. Эффективным методом борьбы с этим явлением служит ФАБО.

10.2.11. Ионно-плазменные методы

Данные методы весьма эффективны. В связи с тем, что их применение требует высокого разрежения, они осуществляются в вакуумных камерах, поэтому являются достаточно дорогостоящими и применяются лишь для весьма ответственных деталей, работающих при высоких температурах в условиях адгезионного и окислительного изнашивания. В условиях вакуума наносимый металл превращается в газ, пар, ионизированный пар и плазму, а затем в атмосфере реакционного или инертного газа оседает на поверхности детали. Покрытие может быть получено способами термического испарения, катодного или ионно-плазменного распыления или с помощью бомбардировки поверхности потоком из частиц осаждаемого вещества. В качестве реакционного газа применяются азот или углеводород, в результате формируется нитридное или карбидное покрытие.

Имеется несколько разновидностей метода. Катодное распыление основано на использовании расположенных в вакуумной камере 2-х электродов. После откачки воздуха камера заполняется аргоном, на электрод с деталью подают отрицательный потенциал. Поверхность детали очищается в газовом разряде путем бомбардировки ионами. Далее отрицательный потенциал подается на испаряемый материал, который распыляется и ионизируется в плазме разряда. Частицы осаждаются на детали, создавая покрытие. Если использовать реакционный газ, пролетая через который атомы металла образуют нитриды, карбиды или окислы, можно получить требуемый структурно-фазовый состав покрытия. Скорость осаждаемых частиц достигает 10 км/с, поэтому они прочно сцепляются с основой. Наилучшие результаты получаются при использовании для испарения лучевых методов нагрева (электронно-лучевого и лазерного). Применяется дополнительное ускорение ионов наложением электрического поля.

Широко распространена технология нанесения покрытий из плазмы дугового разряда с холодным катодом. Материал испаряется катодным пятном электрической дуги - сильноточным низковольтным разрядом, развивающимся в парах материала электродов. Между анодом и катодом из напыляемого материала возникает разряд, протекающий в парах продуктов эрозии катода. Металлическая плазма выделяется из микропятен катода, в зонах которых возникают локально высокая температура и давление. Прикладывая к детали ускоряющий потенциал, повышают скорость генерируемых в плазме ионов. Такая технология реализуется в имеющихся на многих предприятиях установках "Булат". Наиболее часто наносят покрытия из TiC, TiN, Al₂O₃ - наиболее твердых износостойких материалов. Развитие метода связано с внедрением плазменных ускорителей, формирующих сфокусированный высокоскоростной ионно-плазменный пучок, сканирующий поверхность детали. Здесь так же, как и в электронно-лучевой трубке, фокусирование пучка и сканирование осуществляются с помощью электростатических, магнитных линз и отклоняющих пластин. Покрытия имеют небольшую толщину 4÷10 мкм, вызывают заметное улучшение качества поверхностей, обладают высокой коррозионной стойкостью. Они используются для повышения износостойкости металлообрабатывающего инструмента, коленчатых валов, деталей топливной аппаратуры дизелей, клапанов и т.д.

10.2.12. Плакирование

Метод создания толстослойных покрытий применяется при изготовлении деталей или при восстановлении их формы после изнашивания. При этом толщина слоя может составлять несколько миллиметров. Плакирование также используется при изготовлении элементов скользящих электрических контактов в целях экономии дорогостоящих материалов с высокой электропроводностью, например серебра.

Толстослойные покрытия часто наносятся методом прокатки. Сцепление слоев осуществляется за счет диффузии, стимулируемой высокой температурой. Применяются также диффузионная и электроконтактная

сварка, наплавка, припайвание и другие способы. Таким методом получают биметаллические полосы, кольца. Часто наносится слой из порошковых металлов и керамики. Слои припекаются в конвейерных печах и прокатываются вместе с основой в горячем состоянии. Суспензия порошков (смеси с летучими жидкостями с добавкой клеящего вещества) может наноситься по способу шликерного литья. Затем детали просушиваются. На поверхности образуется равнотолщинный слой, удерживаемый клеем. Детали поступают в печь, клей выгорает, а наносимый материал припекается к основе. Образуется пористое твердое покрытие, которое затем пропитывается каким либо служебным материалом, например фторопластом.

Вопросы по теме:

1. Какова сущность ФАБО?
2. Цель ХТО
3. Рассказать о взаимодействии лазерного излучения с веществом
4. Как генерируются лазерные импульсы?
5. Какие свойства имеют лазерное излучение?
6. Как применяются лазерные установки в трибологии?
7. Как влияют параметры дизелей на износ пар трения?
8. Каковы принципы конструирования подшипниковых узлов?

Вопросы по самостоятельной работе:

1. Выполнить реферат по применению лазерных установок в триботехнике.

Литература

1. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Учебник для технических вузов / Под. общ. ред. А.В.Чичинадзе. – М, Центр «Машиностроение», 2001
2. Крагельский И.В. Трение и износ. М. Машиностроение, 1968
3. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. М., Машиностроение, 1988
4. Кадыров С.М., Лебедев О.В., Хакимов А.М. Современные методы нанесения покрытий при производстве и восстановлении деталей машин. Учебное пособие. Ташкент, ГАДИ, 2002, с. 78.
5. Фролов И.О., Раджапова Н.А., Пономарева О.М. и др. Компьютерные технологии в прикладных задачах подъемно-транспортных и строительно-дорожных машин. Учебное пособие. Бишкек, КГУСТА, 2005, с. 118
6. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания. М.: Машгиз, 1982.

7. О.В. Лебедев, С.М. Кадыров. Основы трибологии. Ташкент, «Укитувчи», 2000.

8. Автомобильные двигатели (под редакцией М.С. Ховаха). М.: «Машиностроение», 1977

9. Пономарева О.М. Податливость систем приводов роботов и манипуляторов. Сборник научных трудов республиканской научно-практической конференции «Перспективы развития автомобильно-дорожного комплекса в Республике Узбекистан». Т, ТАДИ, 2004.

11. Кластеризация поверхности трения.

Кластер (cluster) – в переводе с английского – пучок, гроздь. Кластер-это: совокупность точек выборки, близких по своим характеристикам (мат. статистика); один из подходов к созданию многопроцессорных комплексов (вычислительная техника); срастание кристаллов (минералогия), группа звёзд, связанных друг с другом силами гравитации (астрономия), группа близких языков или диалектов (лингвистика), группа связанных между собой отраслей (экономика) и т.д.

Кластеры - многоядерные комплексные соединения, в основе молекулярной структуры которых лежит объемный скелет из атомов металла, непосредственно связанных между собой.

Кластер может обозначать и выделяемый фрагмент (с конечным числом частиц) объемной системы, в частности, твердого тела и малый фрагмент большой молекулы, и ассоциант атомов (ионов) и малых молекул, исследуемый в газовой фазе или в матрице.

Внедрение кластерной терминологии в химии можно рассматривать как попытку обойти вопрос о границе между молекулами и молекулярными комплексами.

В настоящее время термин «кластер» используется в различных областях науки и техники. Такое название носит, например, группа компьютерных мониторов, работающих от одного процессора.

Кластер - это система из многих компьютеров, работающая как один. И с добавлением нового компьютера производительность системы в целом должна возрасти.

Кластер - минимальный размер места на диске, которое может быть выделено файловой системой для хранения одного файла. Определяется он, как правило, автоматически, при форматировании винчестера, по зависимости указанной в таблице 11.1:

Табл. 11.1

Размер раздела	Секторов в кластере	Размер кластера
< 512мб	1	512 байт
< 1024мб	2	1К
< 2048мб	4	2К
< 4096мб	8	4К
< 8192мб	16	8К
< 16384мб	32	16К
< 32768мб	64	32К
> 32768мб	128	64К

Небольшое исключение для системного раздела: если он меньше 2048МБ, то размер кластера, при использовании NTFS, всегда 512 байт.

При знакомстве с новыми конструкционными материалами, созданными в последние десятилетия мы также зачастую сталкиваемся с понятием «кластеры», в данном случае речь идет о химических кластерах. Под определение «кластер» в химии подпадают все молекулы, включающие в себя несколько атомов одного элемента, связанные друг с другом.

Чтобы сделать вывод о принадлежности какой-либо молекулы к кластерам, необходимо иметь её структурную формулу. Рассмотрим простейший пример – молекулу воды H_2O . В нее входит два атома водорода, но является ли вода кластером? Напишем её структурную формулу: $H-O-H$. Видим, что атомы водорода не связаны между собой, поэтому вода не может быть отнесена к кластерам.

Теперь обратимся к перекиси водорода H_2O_2 . Её структурная формула $H-O-O-H$. В этой молекуле атомы кислорода связаны между собой, поэтому перекись водорода может быть названа кластером кислорода.

Понятие «кластер» в химии возникло сравнительно недавно, после открытия веществ



Эти вещества впервые были названы кластерами. В последние 2-3 десятилетия большое внимание стало уделяться издавна известному и такому распространенному элементу – углероду.

Оказалось, что углерод может образовывать самые разнообразные кластеры. Кроме того, давно известный алмаз и графит тоже могут быть отнесены к кластерам углерода.

Рассмотрим механизм образования кластеров на примере алмаза.(рис.11.1)

Обычный атом двухвалентного углерода имеет 3-электронных слоя

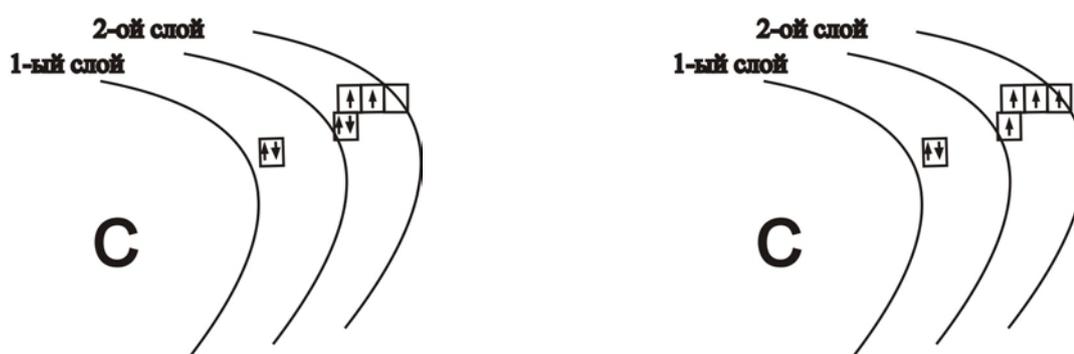


Рис.11.1. Образование кластеров на примере алмаза.

Первый слой заполнен и в химической активности углерода участия не принимает.

На первой круговой орбите 2-го слоя вращаются 2 электрона в разных направлениях (s-орбита). На двух вторых p-орбитах (8) вращаются по одному электрону, и они стремятся найти себе пары. Это нормальное состояние углерода.

Под действием каких-либо экстремальных условий, например, магме (при очень высокой температуре), один электрон с первой орбиты перескакивает на второй уровень, меняет направление вращения и образует третью петлевидную орбиту. Первая орбита тоже становится петлевидной. Теперь атом углерода выглядит следующим образом.

Во втором слое вращаются 4 электрона. Их орбиты представляют собой несимметричные петли 8 (s-3 орбита). В таком состоянии атом С наиболее активен. Теперь он 4-х валентен, т.е. 4 электрона стремятся найти себе пары. Связи у такого атома объемные (можно сравнить с ежом, рис.11.2). При объединении такого атома с другими атомами С образуется алмаз – кластер углерода.

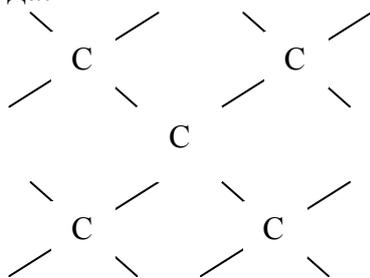


Рис.11.2. Объемные связи атома

Процесс его образования останавливается, когда кончается сырье или изменяются условия. Кристалл алмаза можно представить себе как одну разросшуюся молекулу. В более мягких условиях образуется другой кластер углерода – графит.

В этом случае два электрона вращаются по s-орбитам (короткие связи), а два другие - по вытянутым p-орбитам (длинные связи). Атомы углерода в этом случае группируются по плоскостям. Строение графита очень похоже на обыкновенную книгу, только страницами в случае графита являются графены. Атомы углерода в графенах расположены в виде шестиугольников (гексагоналов), поэтому и говорят, что графены имеют гексагональную структуру. Связи между графенами слабые (когда мы пишем карандашом, то разрушаем эти связи).

Алмаз и графит – примеры естественно-образующихся кластеров.

К искусственно созданным кластерам углерода относятся:

- углеволокна двух видов
- а) $-C\equiv C-C\equiv C-$
- б) $=C=C=C=C=$
- фуллерены (в форме полых шариков);
- астралены, имеющие звездообразную конфигурацию нанотрубки и др.

Часто возникает вопрос, каким образом образуется канал в нанотрубках. Объяснить это явление можно с помощью следующей аналогии. Представим себе, что мы оторвали от книги страницу и оставили её в сухом месте. Спустя некоторое время высыхающая страница свернется в наиболее энергетически удобную для нее форму – форму трубки. То же

самое происходит и с графеном, отделенным от общей графитовой структуры – он сворачивается в нанотрубку.

Все разновидности искусственно создаваемых кластеров получают путем подбора соответствующих условий образования.

Кластеры не обязательно образуются из одного элемента. На свободные связи могут быть присоединены атомы других элементов, называемых лигандами (например, хлор в упомянутом выше молекулах Cu_2 , Cl_2 и др.)

К кластерам могут быть отнесены кристаллы любых металлов и неметаллов и т.п., т.е. все то, что попадает под определение. Однако традиционно к давно известным представителям кластеров это определение не применяется.

Удачные технические термины часто берут на вооружение социологи. Возможно, «кластер» тоже им понравится, и они начнут спекулировать термином, говоря о кластере олигархов, избирателей и т.д.. А на вопрос «почему мы не можем быть вместе?» станут отвечать: «Мы принадлежим разным кластерам общества».

Идея кластера позволяет по-новому взглянуть на возможности развития экономики отдельно взятого региона или государства, объяснить роли отдельных компаний, правительства, иностранной конкуренции в формировании бизнес-климата. Кластеры способствуют появлению новых программ менеджмента, при этом сами зависят от качества работы составляющих компаний. Они формируют новую роль правительства, связанную с устранением препятствий на пути развития кластеров, в том числе на уровне микроэкономики. Кроме того, кластеры являются привлекательными для осуществления полноценного диалога между заинтересованными в развитии региона сторонами - образовательными учреждениями, властью и бизнесом.

Общая схема определения составных частей кластера может быть представлена следующими основными пунктами:

- выявление связи крупной фирмы (концентрации сходных фирм) по вертикали с ниже- и вышестоящими фирмами и организациями;
- исследование по горизонтали в отрасли, в том числе для побочных продуктов и услуг, в том числе за счет использования сходных технологий при производстве;
- определение организаций, обеспечивающих предприятия специалистами, технологиями, информацией, капиталом или инфраструктурой;
- выявление правительственных или регулирующих структур кластера.

Кроме того, кластер обеспечивает координацию между образованием, бизнесом и властными структурами

Кластеризация результатов поиска — группировка результатов поиска в **поисковой системе** по тому или иному признаку с целью сделать результат поиска более удобным.

Электронографирование сервовитной пленки свидетельствует о том, что поверхность меди имеет высокую дисперсность порядка 10^6 м. Такая дисперсность

свойственна кластерам-скоплениям, содержащим 10... 100 атомов и более. Высокая дисперсность обуславливает огромную площадь адсорбции. Главное же состоит в том, что кластеры обладают особыми объемными и поверхностными свойствами, отсутствующими у любой другой формы существования твердых тел.

Высокая дисперсность поверхностного слоя может явиться результатом:

1) деформации; 2) осаждения ионов вследствие разложения комплексных соединений и электрофореза и 3) массового выхода на поверхность дислокаций и случае переползания при работе вакансией но- дислокационного механизма. Очевидно, что осаждение ионов и переползание дислокаций связаны, и тем больше выход дислокаций, тем больше осаждение ионов и тем сильнее кластеризация поверхности, а следовательно, тем больше образуется серфинг-пленок и возможно, тем шире диапазон нагрузок.

Кластеризация при деформировании без избирательного растворения возможна лишь при отсутствии оксидных пленок.

Вопросы по теме:

1. Какими свойствами обладают кластеры?
2. В каком случае возможна кластеризация при деформировании?
3. Дать понятие кластеров трибологии?
4. Какая дисперсность свойственна кластерам сервовитной пленки?
5. Дать схему определения составных частей кластера.

Вопросы по самостоятельной работе

Описать применения кластеров в машиностроении

Литература

1. Лебедев О.В., Кадыров С.М., Сидикназаров К.М. Цикл лекций по трибологии. Т, ТАДИ, 1997, с. 56

12. Нанотехнологии – проблемы развития и индустрия наносистем

12.1. Научные основы нанонауки

«Нано» (от греческого $\nu\alpha\nu\omicron\zeta$ - «карлик») - метрический префикс, означающий миллиардную долю исходных единиц. Другими словами, один нанометр равняется одной миллиардной части метра и является основной единицей измерения, используемой нанотехнологией.

В таком масштабе все меняется: те ограничения, с которыми мы привыкли иметь дело, вдруг перестают сковывать нас.

Нанотехнология оперирует с отдельными атомами для того, чтобы получить структуры с атомарной точностью.

На отрезке длиной в один нанометр можно расположить восемь атомов кислорода.

Нанообъекты имеют физические и химические свойства отличные и от свойств более крупных объектов из того же материала и от свойств отдельных атомов.

Нанотехнологии не есть что-то принципиально новое. Это не революция, а усовершенствование и создание нового поколения машин, приборов, веществ, технологий, материалов и т.д., это попытка как можно глубже понять очень важный отрезок пространственной шкалы организации материи в котором сочетаются те факторы, которые управляют важнейшими процессами преобразования самого вещества и энергии.

Нанотехнологии просто позволяют получать принципиально новые материалы с заданными свойствами, манипулируя отдельными атомами.

В социально-экономических приоритетах государства особое место должно занимать развитие наукоемких производств с высоким уровнем добавленной стоимости. Для лидеров мировой экономики на современном этапе приоритетным направлением безусловно является нанотехнология.

Нанотехнология определяется как наука и техника создания, изготовления, характеризации, реализации материалов, функциональных структур и устройств на атомном, молекулярном и нанометровом уровне. Настоящее «нано» начинается с момента появления наноэффектов – изменений веществ, связанных с переходом к этим масштабам.

Индустрия наносистем представляет собой интегрированный комплекс, включающий: оборудование; материальные средства; систему знаний; технологическую, метрологическую, информационную, организационную культуру и кадровый потенциал, обеспечивающие производство наукоемкой продукции, основанное на новых нетрадиционных свойствах материалов и систем при переходе к наномасштабам.

Число патентов в мире зарегистрированных за последние 30 лет в области нанотехнологий приближается к 100 тысячам.

Современный вид идеи молекулярной нанотехнологии начали приобретать в 80-е годы XX века в результате работ К.Э. Дрекслера и Норио Танигучи.

Произведя соответствующее масштабирование Дрекслер получил следующие численные оценки:

Позиционирование реагирующих молекул с точностью $\sim 0,1$ нм.

Механосинтез с производительностью $\sim 10^6$ опер/сек на устройство.

Молекулярная сборка объекта массой 1 кг за $\sim 10^4$ сек.

Компьютеры с производительностью $\sim 10^{16}$ опер/сек/Вт.

обеспечивающих коренные сдвиги в структуре и техническом уровне производства, во многом определяется уровнем метрологического обеспечения измерений.

Линейные измерения на субмикро- и нанометровом уровнях играют важную роль в разработке принципиально новых технических решений при создании и микросистемной техники различного назначения.

Достижение предельных возможностей в нанометрии связано с использованием высокоразрешающих методов сканирующей зондовой микроскопии: растровой оптической, растровой электронной, сканирующей туннельной и атомно-силовой в сочетании с лазерной интерферометрией и фазометрией.

Особенность нанотехнологии состоит в том, что необходим независимый контроль прецизионного перемещения и взаимного расположения измерительного зонда и объекта, а также фиксация положения объекта с погрешностью 0,1 нм, что соответствует локальности метода сканирующей зондовой микроскопии.

Технология создания мер и стандартных образцов в диапазоне 10^{-9} ... 10^{-5} м должна обеспечивать заданную топологию поверхности, стабильные и воспроизводимые параметры геометрической структуры и отвечать требованиям их применения в различных средствах измерений малых длин.

Согласно предъявляемым требованиям, погрешности рабочих средств измерений длины в диапазоне 0,1-10 мкм составляют 1-10 нм, что соизмеримо с погрешностью Государственного первичного эталона единицы длины.

Указанные проблемы нанометрии предполагают решение следующих важнейших задач:

- разработки концепции метрологического обеспечения измерений длины в диапазоне 1-3000 нм;

- разработки методов лазерной наноинтерферометрии действующих средств измерений линейных перемещений систем микропозиционирования тест-объектов с разрешением 0,1 нм в реальном масштабе времени;

- создание эталонов нового поколения для воспроизведения и передачи размера единицы длины в нанометровом диапазоне на основе сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) и лазерной интерферометрии;

- разработка физических моделей взаимодействия измерительных микроскопов (РЭМ, СТМ, АСМ) с создаваемыми тест-объектами и интерпретации измерений с учетом различных влияющих на них

факторов, позволяющих решить проблему, связанную с локализацией края измеряемого элемента.

В настоящее время в промышленности для измерения малых длин используется значительный парк приборов, основанных на методах физической оптики, электронной и сканирующей зондовой микроскопии.

Инструментальная погрешность лучших измерительных микроскопов в диапазоне 0,7-20 мкм достигает 0,03-0,05 мкм. Точное знание оптического порога требует использования высококачественной оптики, создания системы автофокусировки, термо- и вибростабилизации при высоком уровне автоматизации приборов.

Предельные значения при измерении длины в нано-, субнанометровом диапазонах достигаются при использовании методов сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии (СТМ/АСМ). Игла АСМ, расположенная над сканируемой поверхностью, закреплена на кронштейне, образуя с ним единое целое - контилевер.

Силы, действующие на острие иглы, вызывают изгиб контилевера, что фиксируется датчиком, преобразующим смещение в электрический сигнал. Все известные в настоящее время меры малой длины (от микрометров до десятых долей микрометра) имеют периодическую (шаговую) структуру с аттестованным периодом (шагом) по принятым международным стандартам с использованием явлений интерференции или дифракции света. Обычно период таких структур определяется в долях длины волны излучения стабилизированного He-Ne - лазера.

Основные метрологические характеристики средств измерений малой длины приведены в табл. 12.1

Таблица 12.1

Показатели средств измерений

Тип средства измерений	Диапазон измерений, мкм	Погрешность измерений, мкм
Микроскопы оптические: Телевизионные Фотоэлектрические растровые	2-40 0,8-100 0,3-50	0,15-0,8 0,05- 0,3 0,03-0,1
Микроскопы электронные: Растровые Просвечивающие	0,1-100 0,001-10	0,02-0,1 0,0005- 0,03
Микроскопы сканирующие зондовые: Туннельные Атомно-силовые	0,002-50	0,001-0,01
Лазерные дифрактометры	0,25-50	0,01-0,1
Лазерные эллипсометры	0,005-10	0,002-0,01
Лазерные измерители перемещений	0,001-10000	0,0005-0,05
Меры малой длины Периодические Ширины линии Высоты ступени Специальные	0,2-10 0,1-0,3 0,01-1000 0,3-20,0	0,001-0,01 0,015- 0,03 0,001-0,01 0,001-0,01

Значительный парк средств измерений длины в микро- и нанометровом диапазонах, а также интенсивное развитие нанометрии в ведущих странах мира предопределяют необходимость развития работ по созданию системы метрологического обеспечения измерений длины в нанометровом диапазоне.

Известно, что основой системы метрологического обеспечения линейных измерений является структура передачи размера единицы длины от Государственного эталона единицы длины рабочим средствам измерений, регламентированная соответствующей поверочной схемой. Практическая реализация структуры передачи размера единицы длины в нанометровом диапазоне зависит от наличия соответствующих эталонных средств измерений на каждой ступени передачи.

Государственный специальный эталон единицы длины в диапазоне $10^{+9} - 5 \cdot 10^{+6}$ м должен представлять собой интерференционный компаратор на основе атомно-силового микроскопа, обеспечивающий трёхмерные измерения линейных размеров со стандартной неопределенностью 0,1 нм.

В состав вторичных эталонов в области малых длин должен быть включен комплекс эталонных измерительных интерференционных установок для передачи размера единицы длины всей совокупности типоразмеров мер малой длины, определяемой международной метрологической практикой и результатами международных сличений.

Для современных нанотехнологий характерна тенденция, когда зондовые приборы интегрируются в мощную высокопроизводительную информационную вычислительную среду посредством Интернет сети, так называемую информационно-вычислительную среду (ИВС) нанотехнологий.

Важной частью работы по созданию благоприятной среды для развития нанотехнологий является разработанный учебный сканирующий зондовый микроскоп типа Nanoeducator. В нём в качестве зонда используется легко затачиваемая электрохимическим травлением металлическая игла, что до минимума сводит расходы на его эксплуатацию.

Можно сформулировать следующие основные постулаты индустрии наносистем (табл. 12.2)

Таблица 12.2

Постулаты индустрии наносистем

Наноматериалы	Нанотехнологии	Наносистемы
Макро- и микрообъекты – интеграция искусственно или естественно упорядоченных (самоупорядоченных) наносистем	Наноточность, наноизбирательность, самоорганизация в условиях синтеза макро- и микрообъектов	Макросистемные свойства, проявление кооперативного взаимодействия и избирательности к границ раздела наносистем
Наноконпозиционные материалы; нанодисперсные материалы; наноструктуры и наноконпозиции для	Машиностроительные технологии (механическая и корпускулярная) с наноточностью.	

электронных и фотонных информационных технологий		
От макрокристаллов к композициям нанокристаллов и субмолекулярным комплексам	От микро-наноточности (нанолокализации, нанопозиционированию, наноизбирательности)	От микро к наномасштабам
От статического упорядочения к динамическому (неравновесному)	От квазиравновесных процессов к неравновесным	От изолированных систем к открытым кооперативным
От искусственно-упорядоченных систем к самоупорядоченным	От организации к самоформированию, самосборке (самоорганизации)	От классических размерностей к квантовым
Основные показатели наноматериалов: прочность, эластичность, легкость, энергоемкость, стойкость, селективность, память, биосовместимость		

Материалы на основе углерода Дрекслер рассматривает в качестве основных кандидатов для изготовления конструкций наномеханизмов (хотя свое место находят и другие элементы – водород, кислород, фосфор, кремний, германий и т.д.)

Установлено, что уменьшение размера кристаллов в материале (в первую очередь в металлах) может приводить к существенному изменению их свойств. Изменения наблюдаются, когда средний размер кристаллических зерен не превышает 100 нм и наиболее заметны при размере зерен менее 10 нм.

Особое место среди наноструктурированных твердых тел занимают углеродные нанотрубки, открытые в 1991г. Японский исследователь С.Иджима, рассматривая в электронном микроскопе сажу, полученную в результате распыления графита в плазме электрической дуги, обнаружил тонкие протяженные нити - цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких нанометров и длиной до нескольких микрометров. Они состояли из одного или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых слоев, торцы которых закрывались полусферической головкой. Получив название «углеродные нанотрубки», эти объекты постоянно находятся в фокусе внимания ученых и инженеров благодаря целому ряду необычных физических свойств. Прежде всего, это удивительная прочность в сочетании с высокими значениями упругой деформации, позволяющая получить сверхпрочные композиционные материалы. Необычны и электронные свойства. С одной стороны, есть трубки с хорошей электронной проводимостью, превышающей таковую для

признанных проводников (Si, Ag), с другой стороны, большинство трубок - это полупроводники с шириной запрещенной зоны от 0,1 до 2 эВ. Управляя их зонной структурой, можно создавать различные электронные приборы (запоминающие устройства с плотностью записи до 10^{14} бит/см²). Модуль упругости вдоль продольной оси трубки составляет ~ 7000 ГПа, тогда как у легированной стали и наиболее упругого металла иттрия - 200 и 520 ГПа. соответственно. Кроме того, однослойные нанотрубки способны упруго удлиняться на 16%, показывая свойства сверхупругости.

Открытие углеродных нанотрубок относится к наиболее значительным достижениям современной науки. Эта форма углерода по структуре занимает промежуточное положение между графитом и фуллеренами. Однако по многим свойствам она значительно отличается как от первого, так и от вторых. Поэтому нанотрубки следует рассматривать как новый материал с уникальными физико-химическими свойствами, открывающими большие возможности для широкого применения.

Все материалы, полученные с помощью молекулярного производства, будут новыми, так как до сих пор у человечества не было возможности разрабатывать и производить наноструктуры. (табл.12.3)

Таблица 12.3

Основные методы получения наноматериалов

Группа	Основные разновидности	объекты
Порошковая технология	Метод Глейтера (газофазное осаждение и компактирование); электроразрядное спекание; горячая обработка давлением; высокие статистические и динамические давления при обычных и высоких температурах	Металлы, сплавы, химические соединения.
Интенсивная пластическая деформация	Равноканальное угловое прессование; деформация кручением; обработка давлением многослойных композитов	Металлы, сплавы
Контролируемая кристаллизация из аморфного состояния	Обычные и высокие давления	Аморфные металлические покрытия
Пленочная технология	Химическое осаждение покрытий из газовой фазы (CVD); физическое осаждение из газовой фазы (PVD); электроосаждение; золь-гель технология	Металлы, сплавы, полимеры, химические соединения

Миниатюризация компонент вычислительной техники, увеличение частоты их функционирования представляют собой магистральное направления развития нанотехнологий. На сегодняшний день продемонстрирована работоспособность целого ряда активных компонент – транзисторов, диодов, ячеек памяти – состоящих из нанотрубок, нескольких молекул или даже единственной молекулы. Передача сигнала может осуществляться одним единственным электроном. Наиболее быстрое и производительные компьютеры будущего будут использовать именно нанoelectronную технологию.

В будущем будет развиваться такой раздел информатики, как искусственный интеллект, изучающий возможность обеспечения разумных рассуждений и действий с помощью вычислительных систем и иных искусственных устройств.

При этом в большинстве случаев заранее неизвестен алгоритм решения задачи. Наиболее часто используемые при построении систем искусственного интеллекта парадигмы программирования – функциональное программирование и логическое программирование. От традиционных структурного и объективно-ориентированного подходов к разработке программной логики они отличаются нелинейным выводом решений и низкоуровневыми средствами поддержки анализа и синтеза структур данных. Нанороботы смогут легко создавать любые, самые сложные и совершенные материалы и продукты с абсолютной точностью. Требования, предъявляемые к специалисту в области математического моделирования будут весьма высоки и вместе с тем противоречивы. С одной стороны он должен быть профессионалом, глубоко понимающим достаточно узкую конкретную область исследований.

С другой стороны, обычно ему приходится выступать не как исполнителю, а как ученому, который видит проблему нанотехнологии в целом и способен уточнить, а иногда и радикально изменить постановку задачи, предложенную физиками, химиками, механиками или биологами. Успех в математическом моделировании при решении большинства задач нанотехнологии опирается на триаду: модель – алгоритм – программа.

В США действует программа «национальная нанотехнологическая инициатива» (в 2003 г. её бюджет был 490 млн. долларов). Евросоюз также принял шестую рамочную программу развития науки, в которой нанотехнологии занимают главенствующие позиции.

Разработанные на сегодняшний день научные основы и объекты нанотехнологии структурно выглядят следующим образом (рис. 12.1).

Благодаря нанотехнологиям в будущем:

- наноэнергетика сделает мир более чистым в результате разработки новых пар трения, топливных элементов и транспортных средств;

- сформируется новая экономика, основанная на нанотехнологиях и нанопродуктах;

- быстрое развитие нанопромышленности потребует коренной перестройки системы образования на всех уровнях;

- потребительские и промышленные товары станут более долговечными, качественными и компактными;

- нанобиотехнология сделает жизнь людей более здоровой и продолжительной;

- новые подключенные к Интернету устройства, объединяющие функции телефона, телевизора и компьютера, образуют глобальную систему связи, которая объединит всех, везде и всегда.

В результате последует взрывное развитие искусств, развлечений, образования и науки.

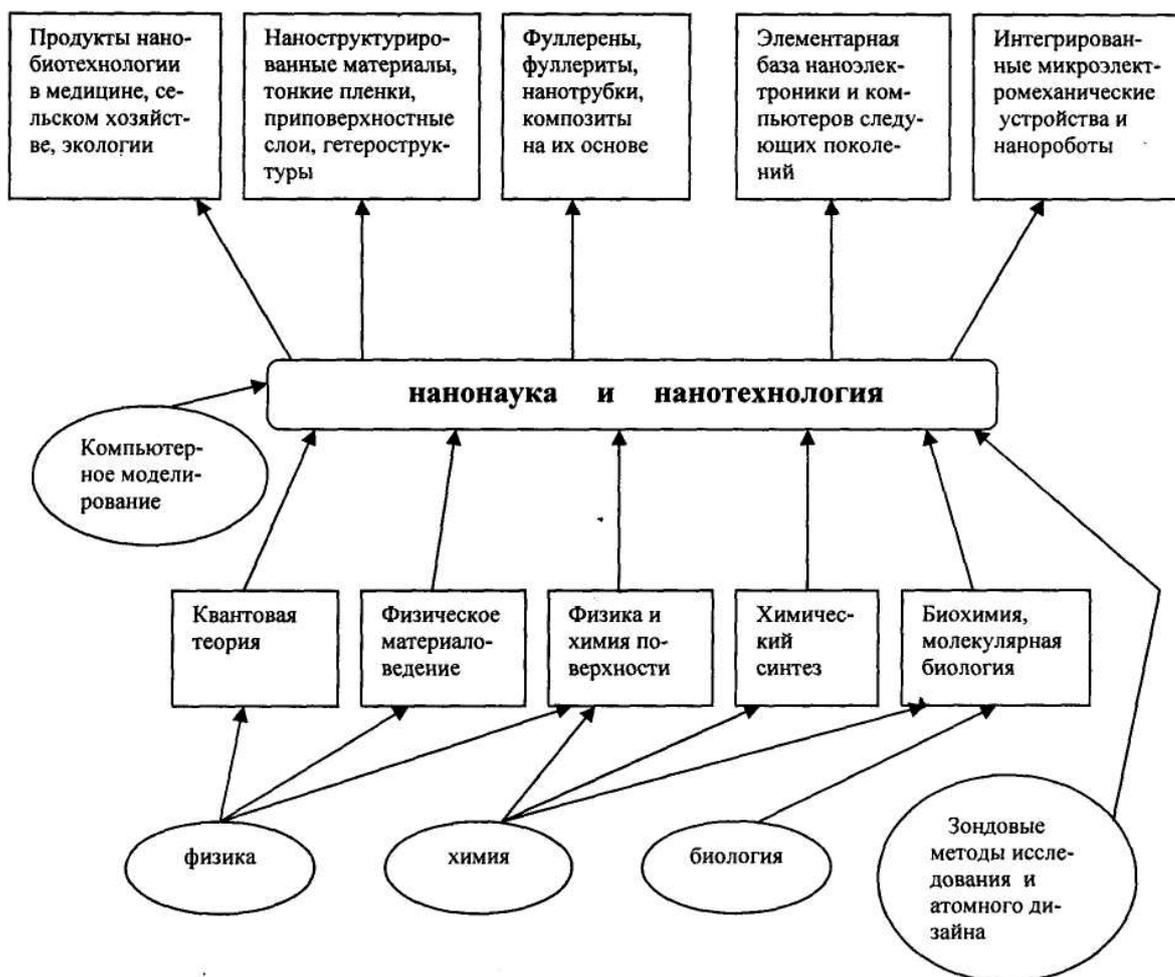


Рис.12.1 Научные основы и объекты нанонауки и нанотехнологии

12.2. Обобщенные модели в наномеханике

В настоящее время в различных областях науки все большее применение находят наноструктуры, наноматериалы и метаматериалы — искусственные кристаллические среды, решетка которых состоит из нанообъектов.

В нанометровом масштабе длин происходит качественное изменение физических свойств структурных элементов среды, которые представляют собой крупную молекулу либо кластер, состоящий из достаточно большого числа атомов. Такие структурные элементы обладают внутренними степенями свободы и их уже нельзя считать материальными точками.

Под материальной точкой понимается малая частица материи, у которой можно пренебречь размерами и вращением и которая обладает единственной физической характеристикой — массой.

Процесс на этом пути связывают с введением в рассмотрение моделей обобщенных континуумов путем включения в них новых качественных характеристик, присущих дискретным структурам.

Первым шагом на этом пути является выбор переменных, описывающих кинематику среды. В классической механике сплошных сред представленный объем (ПО) рассматривается как материальная точка и

принимается принцип напряжений Коши, постулирующий эквивалентность действия всех внутренних сил, приложенных к элементарной площадке, действию их равнодействующей. Однако действие системы сил, приложенных к поверхности, в общем случае эквивалентно действию главного вектора и главного момента, Следовательно, принятие принципа Коши приводит к игнорированию внутренних пар сил и моментных взаимодействий в среде.

Представленный объем (ПО) — это минимальный объем среды, содержащий достаточно большое количество взаимодействующих микрочастиц (атомов или молекул), чтобы можно было ввести статистически устойчивые физические характеристики материала, такие как плотность, температура и т.п.

Добавление к этому объему других частей материала не должно приводить к изменению его физических характеристик. Геометрические размеры ПО должны быть малы по сравнению с областью заметного изменения макроскопических параметров среды.

В некоторых случаях наличием внутренних механических моментов и моментных взаимодействий в материал пренебрегать нельзя.

Качество материальных точек в ПО остается неизменным в процессе движения, т.е. он является механической системой постоянного состава. Силы, действующие между материальными точками, определяются заданием потенциала взаимодействия.

Радиус - вектор центра масс R ПО, его скорость v , импульс P и момент количества движения K определяются как:

$$R = \frac{\sum m_k r_k}{M}, \quad v = \frac{\sum_{i=1}^N m_i v_i}{M} = \frac{dR(t)}{dt},$$

$$P = \sum_{i=1}^N m_i v_i, \quad K = \sum_{i=1}^N m_i (r_i \times v_i),$$

где

m_k, r_k, v_k - масса, радиус-вектор и скорость частиц;

$M = \sum m_i$ - полная масса ПО.

Координаты и скорости материальных точек связаны соотношением

$$r_i = R + r'_i, \quad v_i = V + v'_i$$

где r_i, v_i - координата и скорость материальной точки системы координат (СК).

Механическая энергия ПО равна сумме кинетической и потенциальной энергии входящих в него частиц

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_n v_n^2 + \sum_{n=1}^N \sum_{k \neq n}^N U(r_{nk}),$$

где $U(r_{nk})$ — энергия взаимодействия частиц или

$$E = \frac{1}{2} M V^2 + \left[\sum_{i=1}^N \frac{m_i}{2} v_i'^2 + \sum_{n=1}^N \sum_{k \neq n}^N U(r_{nk}) \right]$$

Здесь первое слагаемое в правой части определяет кинетическую энергию, связанную с движением центра масс ПО. Слагаемые же в квадратных скобках описывают полную энергию внутренних движений, первое из которых является кинетической энергией движения частиц относительно центра масс, а второе — потенциальной энергией взаимодействия частиц.

Можно выделить четыре различных типа ПО: материальная точка, «дышащая» материальная точка, абсолютно твердое тело и малое деформируемое тело, испытывающее аффинные деформации.

Для этих типов ПО составим в виде таблицы классы обобщенных моделей. Среди силовых взаимодействий между структурными элементами можно выделить центральные и нецентральные (моментные), которые в свою очередь подразделяются на локальные и нелокальные. Из 16 комбинаций типов ПО и силового взаимодействия физически может быть реализовано лишь восемь моделей континуума (таблица 12.4).

Таблица 12.4.

Классы обобщенных моделей континуума

Тип взаимодействия	Структура представленного объема			
	Материальная точка	«Дышащая» материальная точка	Твердое тело	Малое деформируемое тело
Центральное локальное	Классическая теория упругости	Теория среды с внутренними «осцилляторами» (пористые среды)	Не существует	Не существует
Нелокальное	Нелокальная теория упругости. Градиентные модели	Нелокальная теория среды с внутренними «осцилляторами»	Не существует	Не существует
Нецентральное (моментное) локальное	Не существует	Не существует	Теория континуума Коссера. Гидродинамическая теория жидких кристаллов	Теория микро-морфного континуума Мин-длина-Эрингена

нелокальное	Не существует	Не существует	Нелокальная теория континуума Коссера	Нелокальная теория микро-морфного континуума
-------------	---------------	---------------	---------------------------------------	--

12.3. Наномасштабный фактор в трибологии.

Трибология имеет статус междисциплинарной области знаний в силу своих специфических связей практически со всеми естественными науками. Зародившись в недрах механики и широко используя ее методы, результаты и подходы, трибология в свою очередь стимулирует интерес механиков к так называемым неклассическим задачам, поставленным с учетом дискретности реального контакта и поверхностных сил. Постановка таких задач все время совершенствуется в связи с имеющей место в трибологии тенденцией перехода к моделям, характерный масштаб которых микро- и все чаще нанометровый. Такой переход проливает свет на фундаментальные проблемы трибологии, такие как связь между адгезионными и деформационными механизмами трения.

Идея о двойственной природе трения была выдвинута И. В. Крагельским, а впоследствии развита им и его школой до уровня теории, правильность основных положений которой подтвердилась в экспериментах. Одним из этих положений является концепция дискретного фрикционного контакта и связанное с ней представление о поверхности трения как объекте, имеющем многоуровневую топографию. Этот подход оказался плодотворным и привел трибологов к изучению процессов трения на неровностях нанометрового масштаба. Основные факторы, действующие при переходе от макро- к наномасштабу, представлены в виде диаграммы на рис.



Рис.12.2. Факторы, влияющие на трение и изнашивание

Миниатюризация моделей фрикционного контакта требует перехода от объемных свойств материалов к их поверхностным свойствам, оцениваемым по данным атомно-силовой микроскопии, измерений адгезии, микро- и наноиндентирования. Но основной проблемой остается физическая интерпретация экспериментальных данных при изменении масштаба измерения.

Прогресс техники затронул много областей, где контроль трения и износа в микро- и наномасштабе стал необходимостью. Это, прежде всего, прецизионные поверхности в робототехнике, медицинских приборах микрохирургии, сверхточные системы механических и электромеханических гироскопов, устройств сервомеханики и микроперемещений. Бурно развивающаяся микро- и нанотрибология стала основой разработки нового класса приборов — микроэлектромеханических систем (МЭМС) — и новой области микросистемных технологий. Микросистема определяется как миниатюрный прибор, сочетающий функции датчика, преобразователя сигнала и исполнительного механизма. Один из примеров МЭМС — датчик, вызывающий при резких ударных ускорениях срабатывание подушек безопасности в автомобилях — это широко применяемое устройство. При помощи технологии изготовления электронных микросхем можно реализовать микросистемы в масштабах тонкопленочных кремниевых изделий толщиной в несколько микрометров и длиной в десятки микрометров.

Трение, смазка и износ в микросистемах реализуются на очень гладких площадках контакта, сравнимых с размерами систем, и поэтому роль адгезии и поверхностных сил в них очень велика. Поскольку электронные технологии получения МЭМС основаны на использовании таких материалов, как кремний, механические и трибологические характеристики которого очень низки, требуется применение специальных сверхтонких покрытий или методов модификации поверхностного слоя — ионная имплантация и т. д. В последние годы удалось изготовить МЭМС из таких материалов, как металлические сплавы и полимеры, путем сочетания электронных и гальванических технологий и при получении прототипов изделий с последующим копированием прототипа методами литья под давлением.

Вопросы по теме:

1. Какова специфическая особенность работы материалов в узлах трения?
2. Роль структуры поверхностного слоя.
3. Как снижают склонность к схватыванию?
4. Какова основа триботехнических материалов?
5. Влияние дисульфита молибдена и серы на триботехнические характеристики.

Вопросы по самостоятельной работе:

1. Каковы свойства композиционных спеченных материалов?

Литература

1. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направлений исследований. / Под ред. М.К.Роко, Р.С. Уильямса: Пер. с англ. – Москва, Мир, 2002 - 292 с.
2. Помогайло А.Д., Резенберг С.С., Уфленд И.К. Наночастицы металлов в полимерах - Москва: Химия, 2000 - 672 с.
3. Сергеев Г.Б. Нанохимия - Москва: изд-во Моск. Ун-та, 2003 - 227 с.
4. Накамото К. ИК – спектры, спектры неорганических и координационных соединений. –Москва: Мир, 1991 - 505 с.
5. Харламов А.И., Кириллова Н.В. и др. Новый способ получения углеродных нанотрубок // Теорет. и эксперим. химия - 2002 – 38, № 6 - с. 347-352.
6. Бронштейн Л.М, Сидоров С.Н., Валецкий П.М. Наноструктурированные полимерные системы как нанореакторы для формирования наночастиц // Успехи химии - 2004 - 73, № 5 с. 542-558
7. Пул Ч., Оуэнс Ф., Нанотехнологии. М, Техносфера, 2004, с.15

13. Технологические аспекты получения и применения деформируемых наноматериалов.

К наноматериалам относят получаемые различными деформационными технологиями [1,2] металлические, керамические, полимерные, сплошные, пористые и дисперсные материалы со структурными элементами, характерные размеры которых от 1 до 10 nm [3-5]. Говорят также о «наноструктурных» и «нанокристаллических» материалах. Первые получают методами интенсивных пластических деформаций (ИПД) [6], а вторые - методами порошковой металлургии (ПМ) или электроосаждением. Большинство методов ПМ и ИПД основаны на воздействии статических или динамических сил давления на исходный материал [7-10]. Такие воздействия часто сочетаются с термическими и физико-химическими [11,12]. Все эти виды воздействий весьма важны и в процессах *эксплуатации изделий* из наноматериалов.

Объекты. К таковым относим деформируемые твердые (пористые) тела и порошки. Первые иногда именуют «наноструктурными» (в основном металлы и сплавы, полученные методами ИПД) [2], а вторые - «нанокристаллическими» материалами [6] (получены методами ПМ).

Методы ИПД (кручение под высоким давлением, равноканальное угловое прессование, прокатка, всесторонняя ковка и т.п.) позволяют получать массивные наноматериалы с практически беспористой структурой в ультрамелкозернистом состоянии (размеры кристаллитов обычно меньше 100 нм) [2,6].

Методы ПМ (изготовление и компактирование порошков) позволяют получать материалы (изделия) с уникальными свойствами и широким спектром сфер применения [6,8,12]. Если для объектов первого типа характерны традиционные для металлообработки формы (лист, брусок, прутки и т.п.), то объекты второго типа могут иметь самую разнообразную форму.

Объединяя два вида материалов термином «наноматериалы», заметим, что они относятся к классу неоднородных (дисперсных). Это гетерофазные сплавы, композиты, горные породы, минералы. При экспериментальном или (и) теоретическом исследовании таких объектов принимают ту или иную их модель - идеализацию реального объекта (физическую систему).

Системы. Системы относятся к твердотельным. Их важнейший представитель - нанопорошки (совокупности наночастиц). Для них характерны размерные эффекты - зависимость механических и теплофизических свойств от размеров частиц. Различают две группы систем: 1) изолированные или слабо связанные между собой частицы, тонкие волокна или пленки; 2) наноразмерные поверхностные слои, не отделенные от массивной подложки, но отличные от нее химическим составом и структурой (однородной, гетерофазной, слоистой или градиентной).

Первая группа систем по геометрическим признакам может быть представлена тремя подгруппами: а) гранулярными, имеющими

приблизительно одинаковые размеры по всем направлениям (сферы, кубики); б) волокнистыми - из волокон произвольной длины, но со средним диаметром поперечного сечения менее 100 нм; в) пленочными - из тонких пленок или пластинок (толщиной менее 100 нм). Системы первой подгруппы изотропны; двух других - анизотропны.

Все системы можно также относить к регулярным и стохастическим. Регулярные пленочные системы образуются рядом параллельных пластин одинаковой или переменной толщины - ортотропных систем со свойствами, изотропными в плоскости пластины и отличными от них в нормальном направлении (по толщине пластины). Системы поверхностных слоев на массивных подложках подразделяются на одно- и многослойные. Слой может считаться наноразмерным по двум признакам: его толщине и среднему размеру зерен (или иных элементов структуры). В пределах каждого слоя структура может быть однородной и неоднородной, в частности - градиентной (с монотонным изменением кинетического параметра по толщине слоя).

Свойства наносистем (механические, теплофизические, электрические) отличаются от таковых у массивных систем за счет размерных эффектов, обусловленных доминирующим влиянием межзеренных границ и свободных поверхностей [5,6,8].

Процессы. Технологические процессы на основе методов ИПД близки к традиционным для металлургии, сочетают воздействие на заготовку высоких давлений и температур. Технологии ПМ относительно новы: их отличает разнообразие и сложное сочетание физических и физико-химических процессов [7,10,12]. Можно выделить два технологических этапа: подготовку шихты (получение порошков) и ее формование (компактирование).

На первом этапе используют подходы: физический (фазовые превращения первого рода в отсутствие химических реакций и диспергирование грубодисперсных частиц в высоко-энергетичных ультразвуковых и других мельницах) и химический (фазовые переходы, сочетающиеся с химическими реакциями). К методам первого подхода относятся: конденсационные, распыление жидкого металла при высоких скоростях охлаждения, газовое распыление, испарение при электронагреве с резким охлаждением в инертной газовой среде, меха-носинтез и самораспространяющийся высокотемпературный синтез и др. Методы второго подхода включают: электрохимический синтез и восстановление в присутствии катализаторов, плазменно-химический метод, золь-гель технологии, радиационно-химический синтез и др.

На втором этапе для получения компактных материалов (изделий) применяют: спекание порошков, их горячее изостатическое и динамическое (импульсное, взрывное) прессование, прокатку металлических порошков, плазменное нанесение защитных порошковых покрытий и др.

Упомянутым технологическим соответствуют физические процессы: деформирование (перенос импульса), массоперенос (диффузия), теплоперенос. Выделить эти процессы «в чистом виде» можно только для

локальных пространственных областей компактируемого порошка или (и) для малых промежутков времени. С точки зрения построения глобальных моделей все процессы надо рассматривать как взаимосвязанные, что относит их к классу «неординарных» краевых задач.

Модели деформирования. В физике твердого тела модели деформирования мезосистем (в т.ч. *нано-систем*) носят эмпирико-качественный характер, базируясь на небольшом числе формул и алгебраических уравнений (типа Харта, Кобла и др.) [6]. Моделирование процессов компактирования порошков требует использования феноменологических макроскопических моделей, которые, однако, должны быть адаптированы к описанию всех процессов с учетом специфики наносистем.

Спекание порошков. Это термически активируемый, самопроизвольный или инициируемый внешним воздействием процесс перехода насыпки частиц в термодинамически равновесное состояние при уменьшении площади свободной поверхности. Внешние воздействия на систему при спекании - силовые (высокие давления), электромагнитные, температурные - порождают многочисленные разновидности спекания (горячее прессование, электроразрядное спекание и др.).

Реологические модели спекания предлагались во многих работах [11,12]. Наибольшее распространение получили макроскопические феноменологические модели, позволяющие определить плотность консолидируемой дисперсной системы в зависимости от ее пористости, давления и других параметров. Как правило, они базируются на работах Я.И. Френкеля, предложившего основное уравнение кинетики спекания:

$$-\sigma \frac{dS}{dt} = 2\mu \int_V \left(\sum \dot{\gamma}_{ik}^2 \right) dV \quad (13.1)$$

где σ - поверхностное натяжение; S - площадь свободной поверхности системы; t - время; η - вязкость вещества; V - объем системы, $\dot{\gamma}_{ik}$ - компоненты тензора скоростей деформации.

В.А. Ивенсеном кинетика уплотнения при спекании трактовалась как вязкое течение сплошной среды; им же предложено полуэмпирическое уравнение, хорошо согласующееся с опытными данными:

$$V = V_0 (qmt + 1)^{-1/m} \quad (13.2)$$

Здесь V , V_0 - соответственно текущий и начальный объемы пор; q , m - кинетические параметры ($q = V^{-1} (dV/dt_{\tau=0})$ - относительная скорость сокращения объема пор в начале изотермического спекания).

В теории (системе реологических моделей) В.В. Скорохода выводятся уравнения, позволяющие рассчитывать линейные деформации и объемные изменения на основе представлений о диссипации свободной поверхностной энергии или работы внешних сил при объемном спекании. Диссипативная функция пористой системы ψ выражалась следующим образом:

$$2\psi = - \left[\left(\frac{\partial F_s}{\partial V} \right) + P_0 \right] \frac{\partial V}{\partial t} \quad (13.3)$$

где F_s - свободная поверхностная энергия, P_0 - внешнее давление, V - объем системы. Функции F_s и Γ выражены через интегральные характеристики системы (пористость, физические параметры вещества). При отсутствии внешних сил и линейном реологическом соотношении между напряжением и скоростью течения В.В. Скороход получил:

$$\frac{d\Pi}{d\tau} = \frac{9}{4} \left(\frac{\sigma}{R_0 \eta} \right) \quad (13.4)$$

где Π - пористость; σ - поверхностное натяжение материала порошка; R_0 - эффективный средний размер частиц; η - коэффициент вязкости вещества частиц порошка. Уравнение (13.4) решалось при $R_0 = R_0(\tau)$ и $\eta = \eta(\tau)$.

Общий вид уравнения кинетики уплотнения при спекании был получен в виде

$$\frac{d\Pi}{d\tau} = -\frac{3}{2} \sqrt{\Pi} \dot{U}^* \Phi \left(\frac{9\sigma\sqrt{\Pi}}{2R_0 P^*} \right) \quad (13.5)$$

где \dot{U}^*, P^* - характерные значения соответственно скорости деформации и давления; $\Phi(\dots)$ - некоторая функция, определяемая спецификой задачи.

Консолидация порошков. Интенсивно изучаются и совершенствуются новые методы: неизотермическое спекание, спекание ковкой, горячее изостатическое прессование и др. Они позволяют получать практически беспористые материалы с наноразмерными зернами. Из методов консолидации нанокристаллических порошков наибольшее внимание привлекают: горячее прессование, спекание под высоким давлением, электроразрядное спекание, спекание в ударных волнах, селективное лазерное спекание и др.

Повышенная склонность нанопорошков к самопроизвольному объединению частиц в агрегаты (конгломераты) при их компактировании приводит к образованию арочных структур, препятствующих равномерному уплотнению. Это ведет к многостадийности процесса.

Средняя интенсивность касательных напряжений в объеме прессовки определялась формулой:

$$\tau_0 = Pf(\rho), \quad (13.6)$$

где P - гидростатическое давление, приложенное к дисперсной системе, $f(\rho)$ - функция относительной плотности ρ вида:

$$f(\rho) = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{1-\rho}}{\rho^2} \quad (13.7)$$

Для пластической деформации обычных металлических частиц условие пластичности имеет вид: $\tau_0 = K$ (K - предел текучести металла на сдвиг). Для наночастиц это условие должно быть скорректировано, т.к. процесс деформирования делится на ряд стадий. На первой из них конгломераты подобны недеформируемым частицам, уплотнение которых происходит за счет их относительного проскальзывания и поворотов. Возникающие при этом силы трения считаются пропорциональными контактному давлению, а последнее -

гидростатическому. Поэтому (13.6) представлено в виде, принятом в теории сыпучих сред:

$$\tau_0 = K_1 + \alpha_1 P \quad (13.8)$$

где K_1 - коэффициент сдвигового сцепления, α_1 - коэффициент внутреннего трения агрегата гранул на первой стадии уплотнения. Из (13.6) - (13.8) следует:

$$\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{1-\rho}}{\rho^2} = \alpha_1 + \frac{K_1}{P} \quad (13.9)$$

Из (13.9) следует, что при $P \rightarrow \infty, \rho \rightarrow \rho_1$, определяемому соотношением

$$\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{1-\rho}}{\rho^2} = \alpha_1 \quad (13.10)$$

при определенном уровне интенсивности касательных напряжений начинаются деформация и дробление гранул - вторая стадия уплотнения. Можно показать, что для второго этапа $\alpha_1 < \alpha_2, K_2 > K_1$. К концу второй стадии ρ достигает значения ρ_2 , определяемого соотношением

$$\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{1-\rho_2}}{\rho_2^2} = \alpha_2 \quad (13.11)$$

Этот процесс продолжается, т.е. на каждой последующей стадии порошок доуплотняется, а кривые уплотнения представляют собой ломаные линии, на каждой стадии описываемые уравнением

$$y = \alpha_i + K_i x \left(y_i = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{1-\rho_i}}{\rho_i^2}, x = 1/P \right)$$

Эксперименты подтвердили приемлемость этой модели, ясно демонстрирующей, на наш взгляд, нестационарность (многостадийность) моделируемых системы и процесса.

Более общее, чем (13.6), условие пластичности порошковой системы приводится в справочниках по порошковой металлургии:

$$\frac{P^2}{\psi(\rho)} + \frac{\tau^2}{\phi(\rho)} = \rho(K + \alpha P)^2, \quad (13.12)$$

где P - гидростатическое давление; K - коэффициент сдвигового сцепления; α - коэффициент межчастичного трения; функции $\psi(\rho)$ и $\phi(\rho)$ имеют вид-

$$\psi(\rho) = \frac{2}{3} \frac{\rho^3}{1-\rho}, \quad \phi(\rho) = \rho^2 \quad (13.13)$$

Для модели гидростатического обжатия порошков $\tau = 0$, и из (13.12), (13.13) следует формула (13.9).

Процессы массопереноса играют ключевую роль в моделях спекания и диффузионно-вязкого течения пористых тел [6], однако рассматриваются они в основном на микро- и мезоуровнях [6]. Главное внимание уделяется определению коэффициентов зернограничной и поверхностной диффузии, а также соответствующих энергий активации [6].

Модели собственно массопереноса (диффузии) в наноматериалах немногочисленны [6]. Это главным образом модели зернограничной

диффузии, воспроизводящие, с модификациями, классическую модель Фишера [6]. В ряде работ приводятся выражения для диффузионных потоков вакансий и атомов в полях упругих напряжений, но конкретные модели взаимодействия полей концентраций и напряжений встречаются редко. Модель процесса диффузии в пластически деформируемом теле носит ограниченный характер, т.к. принятое в ней условие постоянства скорости деформирования не позволяет применить ее к наносистемам.

На первом этапе ограничиваемся системами простейших форм - плиты, цилиндра, шара. Массивные системы подразделяем на однородные и неоднородные (пористые, композитные), дисперсные - на насыпки и консолидированные (с малой или нулевой пористостью), однородные и неоднородные. Неоднородные системы рассматриваются следующих видов: а) сплошная матрица, содержащая включения другого вещества (фазы) простейшей формы; б) слоистая система, состоящая из однородных слоев различных материалов (фаз); в) градиентно-неоднородная система, в которой соответствующая физическая характеристика материала непрерывно изменяется вдоль толщины слоя; г) слоисто-неоднородная система, состоящая из градиентно-неоднородных слоев.

Неоднородные системы также подразделяются на регулярно-неоднородные и случайно-неоднородные. Нас далее будут интересовать только первые, которые могут быть изотропными и анизотропными. Из анизотропных систем первоочередному анализу подлежат ортотропные системы (параметры в некоторых плоскостях которых отличны от таковых в перпендикулярном направлении).

Системы можно относить также к нестационарным (если форма или (и) размеры системы и (или) ее параметры со временем изменяются) и к нелинейным (в случае нелинейности протекающих в них процессов). Все деформируемые системы, строго говоря, нестационарны, однако определенный интерес (как приближения) представляют и модели процессов в стационарных системах.

Процессы и уровни описания. К моделируемым процессам относим: деформирование (всех видов), массо- и теплоперенос. При одновременном протекании и взаимодействии процессов будем называть их термо- и массомеханическими, тепломассопереноса, термомассомеханическими. Целесообразно ограничить классификацию тремя уровнями описания: микро-, мезо- и макроуровнями. Модели процессов в мезосистемах сводятся к моделям микро - или макроуровня, так как специфический мезоуровень описания отсутствует. Поскольку в массовом (исследовательском, технологическом) эксперименте фиксируются макропараметры систем и процессов, идентификация математических моделей по экспериментальным данным возможна только для макромоделей. Они и должны, будучи соответствующим образом адаптированными, стать базисом для моделей наносистем.

Детальный анализ связей между уровнями моделирования для наноструктурных [2] и нанокристаллических систем показал следующее.

1. Деформируемый материал является сложной многоуровневой системой, каждый уровень которой характеризуется специфичными пространственными и временными масштабами.

2. Одноуровневая интерпретация процессов обуславливает их многостадийность, заключающуюся в различном поведении системы на различных временных интервалах.

3. Подструктуры, принадлежащие различным уровням иерархической структуры сложной системы, не могут взаимодействовать между собой, это ведет к невозможности одновременного описания всех уровней (и малопродуктивности «структурно-аналитических теорий»).

Характерные наноразмеры заключены в диапазоне 10^{-1} - 10^3 нм, а времена процессов деформирования - в интервале 10^6 - 10^4 с.

Тепломассообменные процессы, протекающие одновременно с деформационными, должны иметь характерные времена тех же порядков. Это имеет место часто для теплообменных процессов, а для массообменных (диффузионных) - только при высоких температурах и интенсивных пластических деформациях под воздействием импульсных нагрузок, когда коэффициенты диффузии аномально высоки.

Общеметодологические подходы. Моделируют обычно процессы в трех видах объектов: а) одиночная частица, взаимодействующая со «средой»; б) совокупность частиц (насыпка, композит), взаимодействующих друг с другом и со «средой», в) массивные тела, взаимодействующие друг с другом и (или) со «средой». Учет «наноспецифики» во всех случаях может быть осуществлен использованием дискретных, дискретно-континуальных и континуальных моделей.

Фактором верификации дискретных моделей является следствие из них «правильных» континуальных моделей при предельных переходах. Уравнение Ламе теории упругости к таковым не относим: будучи волновым уравнением, оно не описывает эволюционные диссипативные процессы.

Широко распространено представление о нанокристаллическом теле как о двухфазной системе, одной из фаз которой являются границы зерен, а другой - внутризеренное вещество. Двумерная модель структуры такой системы, рассчитанная с помощью потенциала Морзе, представляет собой округлые шестиугольники внутризеренного вещества в окружении узких, отделяющих их друг от друга «каналов» - границ зерен.

Схематическое изображение плоского сечения нанокристаллического материала отличается от расчетного только строго шестиугольной формой сечений зерен. Объемные доли зеренной и зернограничной фаз имеют соответственно вид

$$f_v = 1 - \frac{\delta}{D}, \quad f_b = \frac{\delta}{D}, \quad (13.14)$$

где D - размер зерна (расстояние между противоположными параллельными сторонами шестиугольника), δ - толщина границы зерна. То есть для данной модели структуры нанокристаллического материала можно использовать один из методов расчета эффективных параметров переноса.

Такого рода вариантные расчеты могут быть полезны при отборе мезомоделей структуры и интерпретации на этом уровне результатов экспериментов. Однако задачи построения макроописания процессов, на основе которого возможны прогноз и оптимизация свойств наноматериалов, требуют идентификации параметров моделей (параметров переноса) по опытным данным.

Вопросы по теме

1. Дать описание процесса спекания порошков
2. На чем основано уравнение кинетики спекания
3. Каковы методы консолидации нанокристаллических порошков?
4. Процессы и уровни описания для моделей наносистем
5. Какой вид имеют объемные доли зеренной фазы?

Вопросы по самостоятельной работе

Описать применение нанотехнологии в повышении износостойкости деталей

Литература

1. В.Д. Дорфман, Синтез твердотельных структур, Металлургия, Москва (1986).
2. Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Б.М. Эфрос, Физическая механика гидростатической обработки материалов, ДонФТИ, Донецк (2000).
3. Перспективные технологии (наноструктуры, сверхпроводники), Информ. бюлл. РАН 11, вып. 22, 6 (2004).
4. Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии, Академперіодика, Київ (2004), т. 2, вип. 2, с. 339-750.
5. Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии, Академперіодика, Київ (2004), т. 2, вип. 3, с. 751-1101.
6. Ю.Р. Колобов, Р.З. Вашев, Г.П. Грабовецкая и др., Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов, Наука, Новосибирск (2001).
7. Ф. Кларк, Новейшие методы порошковой металлургии, Атомиздат, Москва (1965).
8. Получение и обработка металлических порошков и изделий из них, Изд-во ЦНИИЧМ им. И.П. Бардина, Москва (1986).
9. Г.М. Жданович, Теория прессования металлических порошков, Металлургия, Москва (1969).
10. В.Е. Перельман, Формование порошковых материалов, Металлургия, Москва (1979).
11. Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов, Наукова думка, Киев (1985).
12. Р.А. Андриевский, Порошковое материаловедение, Металлургия, Москва (1991).

14. Эффект Ребиндера в трибологии.

Эффект Ребиндера заключается в понижении прочности твердых тел в адсорбционно-активной среде вследствие физических и химических взаимодействий в поверхностном слое пар трения.

Эффект открыт в 1928 г. российским ученым, академиком Ребиндером Петром Александровичем (1898-1972), когда он исследовал механизм действия поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Термодинамический эффект Ребиндера обусловлен уменьшением работы образования новой поверхности при деформировании твердого тела в результате понижения его свободной энергии под влиянием активной среды. Молекулярная природа эффекта Ребиндера состоит в облегчении разрыва и перестройке межатомных (или межмолекулярных) связей в твердом теле в присутствии инородных атомов, молекул или ионов.

В физико-химической механике твердых тел обычно рассматривают две основные формы эффекта Ребиндера. Первая форма - охрупчивающее действие среды, в результате которого наблюдается многократное падение прочности твердого тела.

Вторая форма - пластифицирующее действие среды. Оно проявляется в виде снижения макроскопического предела текучести, в уменьшении коэффициента упрочнения (при активном нагружении образца) или в увеличении скорости деформации при испытаниях на ползучесть под действием постоянной нагрузки.

Вариации пластических характеристик приповерхностного слоя материала под действием вызванных в нем остаточными напряжениями концентрационных модуляций должны накладываться на первоначальное изменение этих характеристик под влиянием снижения (или повышения) свободной (а значит и эффективной) поверхностной энергии металла в активной среде. При этом оба указанных эффекта будут ослаблять или усиливать друг друга в зависимости от схемы испытаний и вида среды.

Трение имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Оно обусловлено объемным деформированием материала и преодолением межмолекулярных связей (мостиков холодной сварки, возникающих между сближенными участками трущихся поверхностей)

Объемное деформирование неминуемо. Поскольку поверхности всегда волнисты, шероховаты и неоднородны по своим механическим свойствам, происходит внедрение более жестких элементов поверхностей в более мягкое контртело.

Работа, затрачиваемая на сближение двух твердых тел и формирование истинной площади контакта, всегда намного превышает эту величину. Для примера рассмотрим следующее условие. Пусть необходимо осуществить схватывание двух медных цилиндрических образцов, сжимаемых по торцам, высотой - 1 см каждый. Они предельно гладки, т.е. их шероховатость не превышает 1 мкм, а волнистость – 10 мкм.

Пусть реальная площадь касания составляет 0,1 от номинальной и равна 1 см². Для образования площади контакта необходимо контактную зону привести в пластическое состояние, т.е. напряжение на контакте должно превышать твердость, а деформация соответственно - высоту волны. Необходимая работа сжатия будет состоять из работы пластического деформирования в зоне контакта и работы упругого деформирования:

$$A_{\Sigma} = 2 \left[A_r h_{nl} \sigma_s + \frac{\sigma_{yn}^2}{2E} \cdot h \cdot A_a \right], \quad (14.1)$$

где: $h_{nl} = 10$ мкм; $\sigma_s = 80$ кг/мм²; $E = 1 \cdot 10^4$ кг/мм²

$$A_{\Sigma} = 2 \left[10^{-30} \cdot 80 \cdot 10^2 + \frac{800^2}{2 \cdot 10^6} \cdot 1 \cdot 10 \right] = 22,4 \text{ кг} \cdot \text{см} / \text{см}^2 = 1,86 \cdot 10^7 \text{ эрг} / \text{см}^2$$

Получается, что работа деформирования образцов на 4 порядка больше работы, необходимой для подстройки атомов.

Если даже уменьшить в 10 раз толщину образцов и высоту неровности, все равно эта работа превысит на 2 порядка работу подстройки атомов.

Лимитирующим процессом схватывания является геометрический фактор (образование площади истинного контакта), а не фактор, связанный с молекулярным строением твердых тел, т.е. энергетически не работа, необходимая для подстройки атомов, а работа, необходимая для сближения двух твердых тел и формирования истинной площади контакта.

Кинетика процесса схватывания характеризуется соотношением скоростей, протекающих в зоне касания процессов пластической деформации и подстройки атомов.

П.А. Ребиндер и его ученики рассматривают процесс износа как поверхностное диспергирование в результате многократной пластической деформации, приводящей к упрочнению и усталостному разрушению.

Адсорбционное или адсорбционно-химическое воздействие окружающей среды интенсифицирует этот процесс, облегчая пластическое деформирование и последующее хрупкое разрушение металлов в поверхностном слое. Это в свою очередь облегчает приработочный (полезный) износ в условиях высоких контактных давлений.

Основное уравнение износа по Арчарду, Барвеллу и Стронгу для пластического контакта выражается:

$$\frac{V}{L} = K \frac{N}{P_m}, \quad (14.2)$$

где: V - объем изношенного материала;

K - коэффициент износа; (сталь по стали $K=7 \cdot 10^3$, латунь по стали $K=6 \cdot 10^4$; бронза по стали $K=3,7 \cdot 10^5$; закаленная инструментальная сталь по стали $K=1,3 \cdot 10^4$);

N - нагрузка;

L - путь скольжения;

P_m - давление, соответствующее течению материала.

Было установлено, что Fe_3O_4 является весьма эффективным смазочным средством.

Уменьшение износа может происходить не только потому, что пленка является смазкой, но и потому, что образующаяся хрупкая пленка, разрушаясь при скольжении, блокирует разрушение в тонком поверхностном слое.

Вопросы по теме:

1. В чем заключается эффект Ребиндера?
2. Описать две основные формы эффекта Ребиндера.
3. Как Ребиндер рассматривает процесс износа?
4. Объяснить основное уравнение износа по Арчарду для пластического контакта.
5. Можно ли считать пленку Fe_3O_4 эффективным смазочным средством и почему?

Литература

1. Лебедев О.В., Кадыров С.М. Цикл лекций по трибологии. Т, ТАДИ, 1997, с. 128

15. Поведение и устойчивость искусственно возбужденных трибосистем.

При заданном режиме нагружения и постоянных внешних условиях трибосистемы переходят в стабильное состояние с пониженным уровнем трения после стадии приработки, что определенно свидетельствует об их частичном самоупорядочении на этой стадии. В связи с этим в ряде работ сделаны попытки применить основную концепцию нелинейной термодинамики к кинетике подобного спонтанного перехода трибосистем в более упорядоченное состояние. Механизм самоупорядочения трибосистем, находящихся вдали от состояния равновесия, целиком обусловлен особыми свойствами и внутренними ресурсами трущихся тел и возникает самопроизвольно в тех случаях, когда имеется не один, а по крайней мере два канала диссипации энергии, что придает необходимое разнообразие поведению системы.

Например, возбуждение технической системы путем воздействия на неё сильно упорядоченными потоками энергии или вещества обеспечивает не только переход трибосистемы в существенно более организованное состояние, но и стабильное пребывание в нем.

Эффективность указанного метода для усовершенствования технических трибосистем была экспериментально доказана при открытии эффекта аномально низкого трения. Этот эффект реализовывался при трении металлов в паре с дихалькогенидами (молибденит и др.) или рядом органических полимеров в вакууме с одновременной интенсивной бомбардировкой поверхности этих веществ ускоренными атомами инертного газа (гелия) или электронами. В итоге коэффициент трения снижается на порядки ($f \leq 10^{-3}$).

Прекращение бомбардировки спустя определенное время вызывает постепенное восстановление трения до начальной величины, что говорит об обратимости эффекта аномально низкого трения (АНТ).

Приработка приводит к снижению трения всего на десятки процентов, в то время как эффект АНТ выражается в падении трения в десятки и сотни раз, что свидетельствует о значительно более высоком уровне организованности трибосистемы.

В процессе приработки деталей узлов трения под действием контактной упруго-пластической деформации, являющейся основным активизирующим фактором, происходит структурная трансформация тонких поверхностных слоев путем адсорбционного, диффузионного или химического взаимодействия материала деталей трения со смазочным материалом и с внешней средой. В результате коренных изменений в поверхностных слоях деталей образуется новая фаза, которая и становится объектом поверхностного разрушения на следующем этапе работы узла трения - при минимальном трении в изнашивании. Физико-химические свойства этой новой фазы - вторичных структур значительно отличаются от свойств исходного материала.

Однако механизм поверхностного разрушения реализуется не при всех условиях трения. Существуют такие режимы трения, при которых имеет место и непосредственное разрушение основного материала. Это различные виды повреждаемости: схватывание, микрорезание, внедрение и пропахивание, фреттинг-процесс и др. Следует отметить, что процессам повреждаемости посвящено большое количество исследований в области трения, смазки и износа, хотя они недопустимы при работе машин и во многих случаях были устранены эмпирическим путем.

В отличие от повреждаемости процессы минимального трения и износа, обусловленные образованием и разрушением вторичных структур, классифицируются как процессы нормального трения и износа. Установлено, что в основе этих процессов лежит универсальное явление структурной приспособляемости (СП) материалов при трении.

Универсальность этого явления заключается в том, что оно реализуется при трении любых материалов в определенном зависящем от этих материалов диапазоне нагрузок и скоростей перемещения. Этот диапазон зависит также от состава и концентрации активных компонентов внешней среды и температуры. Характеристики внешней среды могут расширять или сужать диапазон явлений СП и менять уровень нормального трения и износа.

Сущность явления СП состоит в том, что при его реализации происходит масштабный скачок: все взаимодействия трущихся твердых тел и среды (механические, химические, электрические и др.) локализуются в тонкопленочном объекте - вторичных структурах.

В соответствии с минимальными принципами термодинамики необратимых процессов, справедливыми для явления СП, перестройка исходной структуры в новую фазу происходит в направлении максимального упрочнения и ориентации относительно направления перемещения. Механизм упрочнения и ориентации зависит от природы трущихся материалов. Так, для металлических материалов - это ориентация ультрадисперсных кристаллитов (областей когерентного рассеяния); для полимеров - измельчение элементов структуры и ориентация прочных молекулярных связей.

Вторичные структуры экранируют исходный материал от механической и физико-химической деструкции. Внешние механические воздействия неизбежно приводят к разрушению вторичных структур, но эти же воздействия и сопряженные процессы переноса вещества из среды обеспечивают регенерацию экранирующей фазы.

Устойчивость явления СП обусловлена динамическим равновесием и саморегулированием процессов активации, пассивации, а образования экранирующей фазы вторичных структур. С точки зрения неравновесной термодинамики явление СП связано с образованием устойчивой диссипативной структуры потока энергии и вещества внешней среды, направленного в систему трения и поддерживаемого стационарными механическими воздействиями.

При явлении СП минимальные принципы термодинамики проявляются в форме минимизации эффективного объема всех видов взаимодействия при трении, их локализации в тонкопленочном объекте, способном поглощать максимальную энергию до разрушения. Экспериментально установлено, что удельная работа разрушения при явлении СП на несколько порядков выше, чем при других процессах трения.

Рассмотренные механизмы трения и изнашивания исследовались в предположении, что условия внешнего нагружения оставались неизменными. Если рассматривать реальный фрикционный контакт, то очевидно, что указанное может быть отнесено к некоторому конкретному моменту времени предельно короткой продолжительности. Если же исследовать процесс контактного взаимодействия во времени, то определяющими становятся не абсолютные значения действующих при трении сил и соответствующих контактных напряжений, а закономерности их изменений. Это связано, с тем, что физические процессы на фрикционном контакте сложны и взаимно зависимы, приводят к усреднению таких понятий как сила трения, нормальная нагрузка и т.д. Процесс взаимодействия поверхностей и образования фрикционных связей не только изменяет свойства поверхностных слоев, но и определяется этими свойствами.

При граничном трении сила трения носит осциллирующий характер. Система трения в этих условиях находится под действием источника возбуждения ограниченной мощности и реагирует на такое силовое возбуждение в соответствии с ее индивидуальными динамическими особенностями. При этом постулируемое во многих моделях контактного взаимодействия положение о том, что отношение силы трения к нормальной нагрузке (коэффициент трения) отражает процесс, протекающий на контакте, может не соответствовать действительности. Это объясняется тем, что динамика трения не может быть полностью оценена некоторым единственным числом.

Если приработка осуществляется целиком за счет трения, то эффект АНТ требует подвода к трибосистеме дополнительной энергии. Указанная энергия на несколько порядков меньше энергии, затрачиваемой на трение, но поток её обладает существенно большей упорядоченностью по сравнению с подводимым параллельно потоком механической энергии (плотность энергии в веществе зоны контакта при сухом трении не превышает 10^8 - 10^9 эрг/см³).

Для радикального снижения уровня трения трибосистема нуждается в дополнительной подкачке сильно упорядоченным потоком энергии примерно аналогично тому, как это имеет место в лазерах.

Энергетический выигрыш, по элементарной оценке может быть определен из выражения

$$\varepsilon = k\eta V \frac{t_p}{s} \frac{E_1}{E_0},$$

k – коэффициент перекрытия;

η - отношение фактической площади контакта к номинальной;

V – скорость скольжения;

t_p – время релаксации упорядоченной структуры;

s – глубина слоя, подвергаемого воздействию извне;

E_1 – стационарный уровень трения;

E_0 – уровень возбуждения системы за период t_2-t_1 .

Приняв, например, $k=0,3$, $\eta=10^{-4}$, $V=10^2$ см/с, $t_p=10^2$ с, $E_1/E_0=10^{-2}$, $s=10^5$ см определяем, что $\varepsilon=3 \cdot 10^2$. это свидетельствует об энергетической рентабельности метода, несмотря на дополнительный расход энергии. Причиной этого служит малая толщина обрабатываемого слоя, а также существенная живучесть упорядоченных структур.

Эвристическая ценность феноменологического подхода к эффекту АНТ состоит, таким образом, не только в более глубоком понимании связи трения с основными законами природы, но и в стимулировании новых технологических идей и принципов снижения трения и износа.

Искусственное устранение барьера активации при переходе различных уровней возбуждения путем активного возбуждения трибосистемы открывает принципиально новые пути, основанные на целенаправленном, формировании и последующей стабилизации в зоне контакта сильно упорядоченных микроструктур.

Вопросы по теме:

1. Рассказать об самоупорядоченности трибосистем
2. Как влияет приработка пары трения на показатели трения?
3. Как снижается трения за счет потока привлеченной энергии?
4. Каков механизм упорядочения структур возбужденных трибосистем
5. Какие общие закономерности трения и изнашивания установлены в настоящее время?
6. Почему при внешнем трении необходимо учитывать динамический характер контактного взаимодействия поверхностей?

Вопросы по самостоятельной работе

Изучить поведение искусственно возбужденных трибосистем и выполнить реферат по данной теме.

Литература

1. Глансдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / Пер. с англ. – М., Мир, 1973, 302 с.
2. Пономарева О.М., Аннакулова Г.К., Моисеенко Ю.Ю. Обеспечение устойчивости систем приводов колесных машин. Научное издание «Монография». Т. «Фан», 2006. с. 257

16. Прогнозирование износостойкости трибосопряжений по изменениям энтропии.

16.1. Общие понятия энтропии

Энтропия возрастает при нагревании системы и это возрастание тем выше, чем ниже температура системы:

$$\text{Изменение энтропии} = \frac{\text{сообщенная теплота}}{\text{температура}}$$

Если энергия сообщается системе посредством нагревания, то сообщенная теплота положительна и изменения энтропии (левая часть равенства) тоже положительна.

Напротив, если из системы происходит утечка энергии в окружающую среду посредством теплообмена, величина сообщенной теплоты отрицательна, так что в итоге энтропия убывает. Если же энергия сообщается системе путем совершения работы (а не теплообмена), то сообщенная теплота равна нулю, и энергия остается без изменения. Если нагревание происходит при высокой температуре, то знаменатель правой части равенства велик, вследствие чего при заданном значении количества теплоты в процессе нагревания изменение энтропии мало.

Если нагревание происходит при низкой температуре, тогда знаменатель равенства (значение температуры) мало, и при том же количестве теплоты изменение энтропии велико.

Однако, эти рассуждения правомерны, если в течение всего процесса передачи энергии посредством теплообмена температура системы постоянна, иначе равенство, выражающее изменение энтропии, теряет смысл.

Для измерения энтропии используется термометр, датчик регистрации количества теплоты и микропроцессор, передающий показания энтропии на цифровой дисплей. Микропроцессор следит за температурой, измеряемой термометром и пересчитывает её непосредственно в изменение энтропии.

Нагревание надо проводить исключительно медленно, так, чтобы не создавались «горячие точки» и вызванные этим искажения показателей (процесс нагревания должен быть квазистатическим).

$$\text{Прирост температуры} = \frac{\text{коэффициент}}{\text{пропорциональности}} \times \frac{\text{сообщенная}}{\text{теплота}}$$

Коэффициент пропорциональности связан с теплоёмкостью материала

$$S(T) = S(0) + \int_0^T \left[\frac{C_p(T)}{T} \right] dt$$

Для идеальных кристаллических форм материала $S(0) = 0$.

Значения энтропии, например, медной втулки равно 33.1 Дж/К·моль, для сульфата меди 300.4 Дж/К·мол, для воды 69.9 Дж/К·мол.

Энтропия характеризует условия, при которых запасается энергия: если энергия запасается при высокой температуре, её энтропия относительно низка, а качество высоко.

Если то же количество энергии запасается при низкой температура, то энтропия, связанная с этой энергией велика, а её качество – низко.

Одним из вкладов в энтропию дает изменение, происходящее в результате перестройки химических связей и выхода энергии в окружающую среду. При перестройке химических связей происходит положительное изменение энтропии, поскольку высвободившаяся энергия рассеивается в окружающую среду. Чтобы оценить изменение энтропии при превращении молекул исходных веществ в молекулы продукта реакции, необходимо определить значения энтропии исходных веществ и продукта, и вычислить разность между ними.

Хаос определяет не только конечную участь системы, но и скорость, с которой система к ней стремится.

Поскольку интенсивность колебаний прямо связана с энергией, особенно большие колебания означают, что на данном участке происходит интенсивное тепловое движение. Это предполагает наличие большой плотности энергии в рассматриваемой области.

Скорость системы зависит именно от вероятности возникновения скоплений энергии. Хаос влияет на эту вероятность, тем самым, управляя направлением и скоростью системы.

Вероятность того, что энергия активации может накопиться при данной температуре, задается следующим выражением, известным как вероятность Больцмана.

$$\text{Вероятность} = \exp\left(-\frac{\text{Энергия активации}}{\text{температура}}\right),$$

где \exp – основание показательной функции.

Отсюда видно, что при любом масштабе порядок может возникнуть за счет хаоса; точнее говоря, он создается локально за счет возникновения неупорядоченности, где-то в ином месте.

Возможны локальные уменьшения хаоса, которые воспринимаются как появление определенной структуры, однако они неизменно сопровождаются соответствующим увеличением хаоса, где-либо в другом месте.

Самоорганизация поддерживается на Земле за счет поглощения отрицательной энтропии. По предложению Бриллюэна отрицательную энтропию стали называть негэнтропией. Негэнтропийный рацион Земли составляет по оценке Ребане, 10^{22} кал/град в год. Поглощая солнечное излучение, растительный покров понижает эффективную температуру уходящего излучения, увеличивая поток отводимой энтропии. Это увеличивает энтропию Вселенной, но обеспечивает поддержание стационарного состояния на Земле. В этом проявляется общее свойство жизни как упорядоченной подсистемы - она ускоряет рост энтропии системы в целом, но создает упорядоченность локально.

Из указанных рассуждений вытекают следующие формулировки:

1. **Энтропия** – функция состояния системы, определяемая тем, что её дифференциал (dS) при элементарном равновесном процессе равен отношению бесконечно малого количества теплоты (dQ), сообщенной системе, к термодинамической температуре (T) системы $T = \frac{dQ}{dS}$.

2. **Уравнение баланса энтропии**

$$\rho \frac{dS}{dt} + \text{div} S = \sigma [S]$$

$\rho \frac{dS}{dt}$ - скорость прироста энтропии в данной области;

$\text{div} S$ - скорость оттока энтропии из данной области в окружающую среду;

$\sigma [S]$ - скорость возникновения или производства энтропии внутри данной области.

3. **Поток энтропии** – приращение энтропии системы за единицу времени в результате подвода (отвода) энтропии извне.

Поток энтропии равен $\int J_s n dF$,

где F - поверхность, ограничивающая рассматриваемую систему;

J_s - вектор плотности потока энтропии;

N - вектор внешней нормали к поверхности.

4. **Производство энтропии** - приращение энтропии системы в единицу времени вследствие необратимых процессов, происходящих в самой системе

$$\frac{\partial S^i}{\partial \tau} = \sum_j X_j I_j$$

где I_j – обобщенный поток;

X_j – соответствующая обобщенная сила.

5. **Энергия Гиббса (изобарно-изотермический потенциал)** – функция состояния системы (G), определяемая разностью между энтальпией (H) и произведением термодинамической температуры (T) на энтропию (S).

$$G = H - TS$$

Свободная энергия Гиббса (энергия пригодная для совершения работы) определяется выражением:

$$\text{Свободная энергия} = \text{Полная энергия} - (\text{Температура}) \times \left(\begin{array}{c} \text{Изменение} \\ \text{энтропии} \end{array} \right)$$

6. **Изоэнтропический процесс** - процесс, происходящий при постоянной энтропии системы.

7. **Топологическая энтропия** - топологическая энтропия непрерывного отображения компактного пространства была определена Адлером, Конхеймом и Мак-Эндрю.

Для подмножеств компактных пространств энтропия определяется с помощью процедуры, напоминающей конструкцию хаусдорфовой размерности. Это дает возможность обобщить известные результаты о хаусдорфовой размерности квазирегулярных точек некоторых мер и дать

определение нового типа сопряженности, промежуточного между топологической сопряженностью и сопряженностью в смысле теории меры.

Таким образом, энтропия является мерой беспорядка (хаотичности); чем выше энтропия, тем менее упорядочена система. Например, энтропия льда меньше энтропии воды.

16. 2. Оценка работоспособности трибосопряжений.

Известно, что машины подвержены непрерывным качественным изменениям, их направление предопределяется вторым законом термодинамики, согласно которому упорядоченные системы (к ним относятся все технические устройства) имеют тенденцию самопроизвольно разрушаться, т. е. утрачивать упорядоченность, заложенную в них при создании. Эта тенденция проявляется при совместном действии многочисленных дезорганизующих факторов, которые не могут быть одновременно учтены при любом рассмотрении. Поэтому никогда не прекращающийся в машине процесс ее разрушения кажется нерегулярным, случайным.

Закономерности, присущие равновесным состояниям сложных объектов машиностроения, во многом аналогичны закономерностям, имеющим место в термодинамических системах, описываемых уравнениями статистической физики. Для описания поведения системы в целом можно использовать подход, не требующий специальной информации о поведении отдельных элементов системы. Если при этом учитываются некоторые дополнительные условия, исходящие из конечности ресурсов системы, то такой подход сводится к задаче математического программирования, изоморфной первой вариационной задаче теории информации. В статистической механике ее решение приводит к распределению Больцмана. Согласно решению этой задачи, эволюция замкнутой системы осуществляется в направлении наиболее вероятного распределения элементов. При этом для обратимых процессов приращение энтропии равно нулю.

Применительно к реальным техническим системам справедлив принцип, аналогичный второму началу термодинамики. Возрастание энтропии таких систем описывается уравнением баланса энтропии:

$$dH = dH_e + dH_i, \quad (16.1)$$

где dH — изменение энтропии системы; dH_e — обратимое изменение энтропии за счет обмена с внешними источниками; dH_i — изменение энтропии, обусловленное необратимыми процессами внутри самой системы.

При этом следует учитывать, что величина dH_i в условиях необратимых процессов всегда возрастает:

$$dH_i > 0 \quad (16.2)$$

В свою очередь составляющая dH_e может быть как положительной, так и отрицательной, в связи с чем общее изменение энтропии системы dH также может иметь как положительную, так и отрицательную величину.

По-видимому, для большинства реальных технических систем, построенных по иерархической схеме (например, по схеме управляющий механизм — привод — исполнительный механизм), соблюдается более жесткое, чем в термодинамических системах, условие

$$dH_e > 0 \quad (16.3)$$

В пользу такого предположения свидетельствует тот факт, что все реальные механизмы характеризуются прогрессирующим ухудшением своих характеристик в процессе эксплуатации. В этом случае

$$dH_e > 0, \quad dH_i > 0$$

либо

$$dH_e > 0, \quad dH_i > 0, \quad dH_i > dH_e$$

В этой связи для большинства реальных технических объектов справедлива приближенная (с точностью до постоянной интегрирования) зависимость, которую можно использовать для прогнозирования возрастания их энтропии во времени:

$$H = \int_0^t H(t) dt \quad (16.4)$$

При этом энтропия H возрастает со временем и достигает максимума к моменту выхода механизма из строя.

Проиллюстрируем описанные положения на примере исследования состояния узлов машины. Эти исследования проводились для шестеренчатых насосов гидропривода. В качестве координат вектора состояния использовались энтропии двух выходных параметров: величины кинематической погрешности и механический КПД насоса (η_m). Приращение энтропии кинематической погрешности находилось по следующей формуле:

$$H_F = \sum_{i=1}^{50} \frac{n_i}{N} \ln \frac{N}{n_i} + \ln d, \quad (16.5)$$

где $N = 2500$ — число отсчетов за оборот ведомого вала; n_i — количество попаданий в интервалы; d — ширина интервалов.

Энтропия КПД вычислялись для значений $\eta(0) = 0,63$ и $\eta(t) = 0,59$ по формуле

$$H_p = \log_2 \left(\frac{\sqrt{2\pi e}}{U_{(p)} \Delta P} P_{\text{вых}} \right) \approx \log_2(1 - \eta_m) = -1,443 \ln(1 - \eta_m), \quad (16.6)$$

где $P_{\text{вых}}$ — выходная мощность на ведомом валу; η — КПД механизма; ΔP — ширина интервала отсчетов по мощности; $U_{(p)}$ — квантиль двухстороннего нормального распределения для величины p .

Таблица 16.1

Энтропии выходных параметров шестеренчатого насоса

№ п. п	1	2	3	4	5	6
$H(F)$	3,77	3,75	3,73	3,69	3,66	3,64
$H(\eta_m)$	1,42	1,40	1,38	1,33	1,29	1,25

В табл. 16.1 представлены значения энтропии кинематической погрешности $H(F)$ и КПД $H(\eta_m)$, полученные при различных уровнях нагружения и разных наработках, а следовательно, различных степенях износа механизмов. Видно, что энтропийные характеристики имеют тесную линейную связь с коэффициентом корреляции, близким к единице:

$$H(F) = 2,58 + 0,84H(\eta_m), \quad r = 0,988$$

В то же время сами значения потерь $(1 - \eta_m)$ и наибольшей кинематической погрешности F_{max} оказываются связанными довольно плохо:

$$1 - \eta_m = 0,33 + 0,00189 F_{max}, \quad r = 0,470$$

Этот факт может быть объяснен тем, что энтропийные характеристики обладают гораздо большей информативностью, чем отдельные значения характеризующего ими фактора. Это связано с тем, что энтропийные характеристики рассчитаны по всему объему исходных данных и учитывают не только среднее значение фактора, но и его шумовые характеристики.

Так, нами исследовалась геометрия износа деталей зацепления шариковой радиально-плунжерной передачи с $U = 17$ в условиях интенсивного износа. Интенсификация износа достигалась за счет того, что в смазку добавлялся абразив. Зернистость используемого абразива составляла 32 - 40.

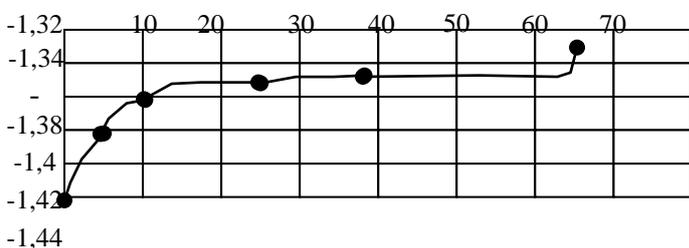


Рис. 16.1. График изменения энтропии кинематической погрешности в процессе наработки шестерен насоса

Измерения размеров следов износа и размеров деталей зацепления проводились после приработки передачи в течение 0,5 ч без абразива, а затем после работы в среде абразива в течение 3, 10, 26, 54 и 56 ч (до полного отказа). Одновременно рассчитывалась величина энтропии кинематической погрешности. Из рис. 16.1 видно, что энтропия имеет как резкое выделение участка прогрессирующего износа, так и возможность однозначного определения состояния механизма, так как ее величина увеличивается во всем интервале наработки механизма.

Энтропия выходных параметров достаточно чувствительна к изменению размеров деталей зацепления. Так, на рис. 16.2 представлен график зависимости энтропии кинематической погрешности от величины износа зубчатого венца. Эта зависимость близка к линейной и имеет коэффициент корреляции, равный $r = 0,942$.

Энтропия механизма является параметром, достаточно чувствительным и к появлению в спектре кинематической погрешности высокочастотных гармонических составляющих, что свойственно

механизмам при увеличении зазоров в подшипниках и прогрессирующем износе плунжеров. Так, на рис. 16.3 представлены графики кинематических погрешностей исследуемой передачи в зоне нормального износа (а) и в зоне прогрессирующего износа (в), а также графики плотностей их распределения (б, г). При отсутствии высокочастотных составляющих (а, б) плотность распределения приближается к плотности распределения нормального закона и имеет вид одномодовой кривой. С увеличением удельного веса высокочастотных составляющих (в, г) плотность распределения приобретает вид кривой с более плоской вершиной (близкой к плотности распределения равной вероятности) или даже многомодовой кривой. Поэтому и энтропия, будучи функцией плотности распределения, улавливает изменения закона распределения кинематической погрешности.

Недостатком параметра является его связь с нагрузочным режимом. Так как при различных нагрузках могут возникать резонансные явления, которые искажают общую зависимость энтропии от наработки, необходимы дополнительные исследования для выяснения оптимального нагрузочного режима для определения энтропии кинематической погрешности. При этом следует учитывать тот факт, что реальные механизмы не всегда могут быть описаны как замкнутые системы, обладающие свойством увеличения энтропии в процессе их эволюции. По-видимому, этот вопрос нуждается в дополнительном исследовании.

Таким образом, на основе изложенного можно сделать вывод, что по изменению уровня энтропии отдельных параметров можно достоверно судить о состоянии диагностируемого объекта. Это доказывает также правомерность использования энтропии кинематической погрешности и КПД для диагностики износов узлов машин.

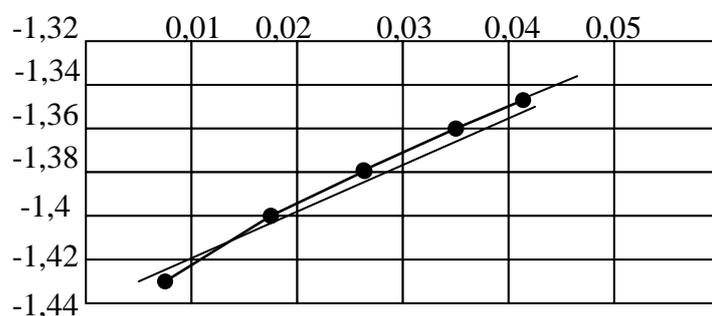
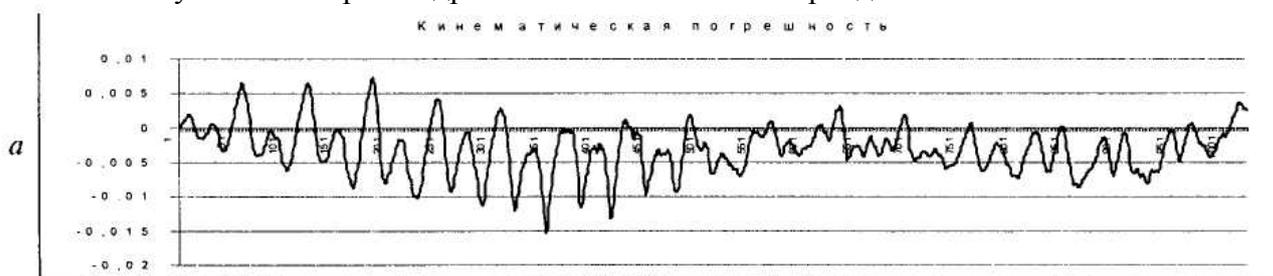


Рис. 16.2 График зависимости энтропии кинематической погрешности от величины износа зубьев шестерни гидронасоса и ее линейный тренд



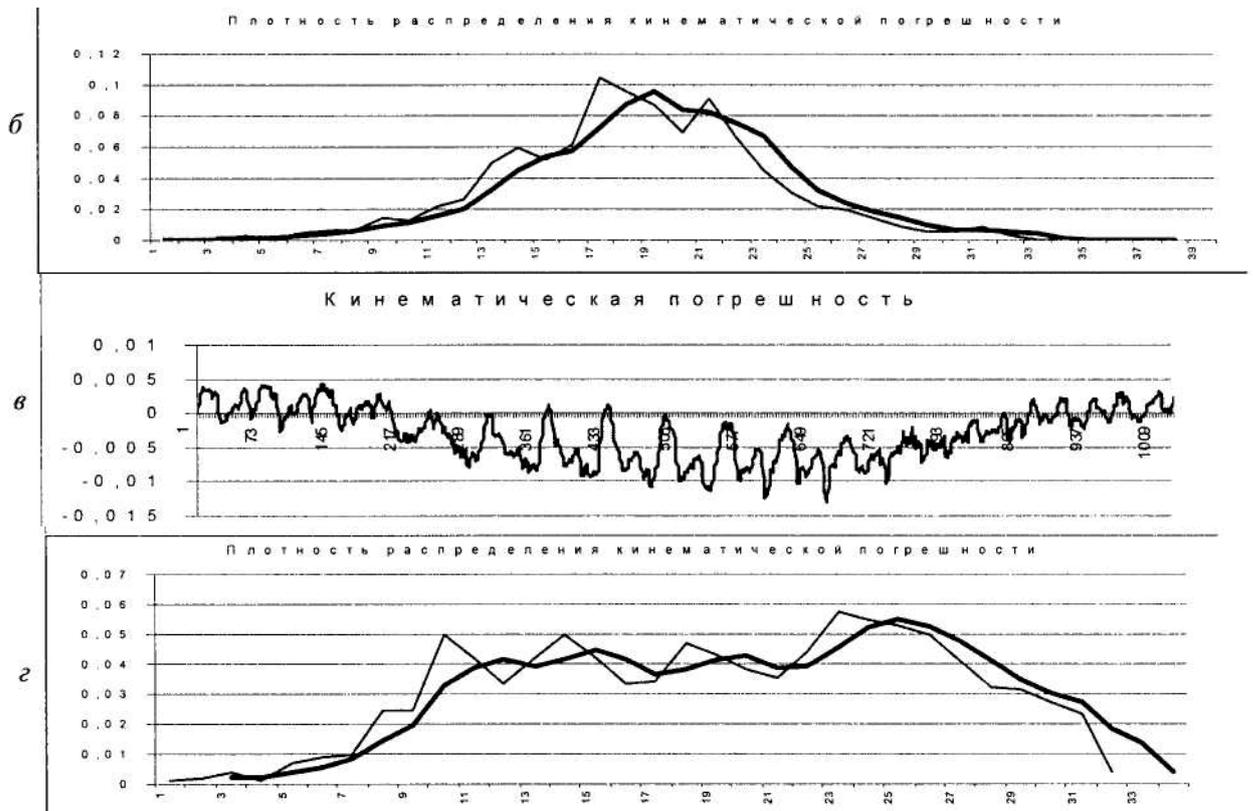


Рис. 16.3. Графики изменения закона распределения кинематической погрешности зуба шестерни насоса в процессе наработки

Следует также отметить, что энтропийные параметры механизмов имеют тесную связь с информационным содержанием сигналов и общим качеством механизма. Пусть измеряемый сигнал y (например, момент на валу M) представляет собой аддитивную сумму полезного сигнала (постоянной составляющей x) и нормального шума (переменной непериодической составляющей n), т. е.

$$y = x + n; \quad M_y = M_x + M_n \quad (16.7)$$

Известно, что информация, содержащаяся в сигнале с шумом, относительно шума может быть достаточно просто определена соотношением

$$I = \log_2 \left(\frac{P_{an}}{P_{ост}} \right), \quad (16.8)$$

где P_{an} — общее поле сигнала или апертюра; $P_{ост}$ — поле остаточных ошибок или разрешающая способность, откуда

$$I = \log_2 \left(\frac{\int_0^T [M_x(t) + M_n(t)] dt}{\int_0^T M_n(t) dt} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{\int_0^T M_x(t) dt}{\int_0^T M_n(t) dt} \right) \quad (16.9)$$

С другой стороны, принимаемый сигнал может быть определен через дифференциальные энтропии сигнала $h(y)$ и шума $h(n)$:

$$I(x/y) = h(y) - h(n) \quad (16.10)$$

Для аддитивного нормального шума

$$h(n) = \log_2 \left(\frac{\sqrt{2\pi e}}{\Delta X} S \right), \quad (16.11)$$

где ΔX — шаг квантования по измеряемому сигналу X ;

S — его среднеквадратическое отклонение. Поэтому с учетом зависимостей (16.10), (16.11) получим

$$h(y) = \log_2 \left(\frac{U_{(p)} S + M_x \frac{\sqrt{2\pi e}}{\Delta X} S}{U_{(p)} S} \right) = \log_2 \left(\frac{\sqrt{2\pi e}}{\Delta X U_{(p)}} M_y \right) \quad (16.12)$$

Рассмотрим сложный механизм как кодер-устройство, кодирующую информацию, содержащуюся в выходных параметрах механизма, например, в его крутящем моменте. Если сигнал на входе кодера расценивать как несущий априорную информацию $I_{вх}$ относительно входного шума механизма, а сигнал на выходе — как несущий апостериорную информацию $I_{вых}$, то передаточные свойства механизма могут быть охарактеризованы величиной потери информации при прохождении сигнала через механизм

$$\begin{aligned} \Delta I &= I_{вх} - I_{вых} \\ I_{вх} &= \log_2 \left(1 + \frac{M_{вх}}{U_{(p)} S_{вх}} \right) = h(y_{вх}) - h(n_{вх}) \\ I_{вых} &= \log_2 \left(1 + \frac{M_{вых}}{U_{(p)} S_{вых}} \right) = h(y_{вых}) - h(n_{вых}) \end{aligned} \quad (16.13)$$

Следовательно,

$$\Delta I = \Delta I(y) - \Delta I(n), \quad (16.14)$$

где $\Delta I(y) = h(y_{вх}) - h(y_{вых})$ — информационные потери, связанные с кодированием сигнала (с его прохождением через механизм);

$\Delta I(n) = h(n_{вых}) - h(n_{вх})$ — информационные потери, связанные с наличием собственных шумов канала (механизма).

С учетом формул (16.13), (16.14) получим (при условии равной точности измерений входного и выходного моментов ΔM)

$$\Delta I(y) = \log_2 \left(\frac{M_{вх}}{M_{вых}} \right) = \log_2 \left(\frac{1}{U\eta} \right) \quad (16.15)$$

$$\Delta I(n) = \log_2 \left(\frac{S_{вых}}{S_{вх}} \right) \quad (16.16)$$

$$\Delta I = \Delta I(y) + \Delta I(n) \rightarrow \min \quad (16.17)$$

$$\begin{aligned} S_{вых} &= \sqrt{S_{вх}^2 + \Delta S^2} \\ \Delta S &= \sqrt{S_{вых}^2 - S_{вх}^2}, \end{aligned} \quad (16.18)$$

где U — передаточное отношение; η — КПД механизма.

С учетом формул (16.15), (16.16) соотношение (16.10) получает четкую и очевидную количественную трактовку: наилучшим механизмом может быть признан тот, у которого при наибольшем значении коэффициента усиления $U\eta$, т. е. при минимуме $\Delta I(y)$ одновременно мало значение

собственного шума $S_{\text{ВЫХ}}$, т. е. при минимальном $\Delta I(n)$.

Собственные шумы механизма AS могут быть определены при условии нормальности и независимости шумов $S_{\text{ВХ}}$ и $S_{\text{ВЫХ}}$ по правилу квадратического суммирования

а потери $\Delta I(y)$ разделены на составляющие

$$\Delta I(y) = \log_2 \left(\frac{1}{U\eta} \right) = -\log_2 U - \log_2 \eta = \Delta I(\omega) + \Delta I(p), \quad (16.19)$$

где $\Delta I(\omega) = -\log_2 U$ — информационные потери, связанные с колебаниями передаточного отношения механизма (наличием кинематических погрешностей);

$\Delta I(p) = -\log_2 \eta$ — информационные потери, связанные с потерями мощности в механизме.

Критерий (16.17) позволяет сравнивать между собой как разнотипные механизмы, так и механизмы одного типоразмера, но имеющие различия, связанные с погрешностями изготовления и процессом эксплуатации. При использовании информационного подхода представляется возможным в одних и тех же единицах (например, битах) представить требования к объекту в целом и каждому его элементу. Этот критерий может использоваться для диагностики состояния механизма по изменению информационной емкости его выходных параметров относительно начальной емкости. Такой вывод представляется очевидным в силу тесной связи понятий энтропии и информации.

Использование информационных характеристик в контрольно-диагностических задачах позволяет построить оценку идентичности объекта и заданного класса, т. е. решать задачу распознавания образов. Так, из условия (16.10) видно, что безусловная энтропия $h(y)$ разбивается на две составляющие. Первая из них является мерой количества информации о выходной переменной и может быть получена по входной переменной X , а вторая — мерой априорной неопределенности, вызванной влиянием собственных шумов объекта. В качестве информационной меры принадлежности объекта заданному классу можно принять $1(x/y)$ или относительную величину (если x и y дискретны)

$$q(x/y) = \frac{I(x/y)}{H(y)} \quad (16.20)$$

Если x и y непрерывны, то

$$q(x/y) = \frac{I(x/y)}{\sqrt{1 - (I(x/y))^2}} \quad (16.21)$$

Приведенные результаты анализа позволяют на основе единого информационного подхода строить комплексные критерии качества

механических объектов, учитывающие многообразие требований к их статическим и динамическим эксплуатационным характеристикам. Эти критерии позволяют сравнивать разнотипные механизмы, имеющие отличия по принципам работы, а также механизмы одного типоразмера, имеющие различия, связанные с процессами их изготовления и эксплуатации. На основе такого критерия появляется возможность диагностики износа пар трения машин.

16.3. Энтропийное значение погрешности

С точки зрения вероятностной теории информации смысл измерения состоит в сужении интервала неопределенности от значения известного до его проведения, до величины α , называемой энтропийным интервалом неопределенности. Энтропийный интервал определяется по формуле:

$$\alpha = 2 \Delta_{\alpha} = e^{H(x/x_d)} \quad (16.22)$$

где Δ_{α} – энтропийное значение погрешности;

$H(x/x_d) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \ln[p(x)] dx$ – энтропия действительного значения x измеряемой величины вокруг полученного после измерения значения x_d , т.е. энтропия погрешности измерения.;

$p(x)$ – плотность распределения вероятности измеряемой величины.

Размер энтропийного интервала неопределенности может быть найден строго математически для любого закона распределения.

Для нормального распределения $H(x/x_d) = \ln(\sigma \sqrt{2\pi e})$ и $\alpha = \sigma \sqrt{2\pi e} = 4,133\sigma$. Для распределения Симпсона $H(x/x_d) = \ln(\sigma \sqrt{6e})$ и $\alpha = \sigma \sqrt{6e} = 4,04\sigma$

Соотношение между Δ_{α} и средним квадратическим σ значениями погрешности различно для разных законов распределения и его можно характеризовать энтропийным коэффициентом $k = \Delta_{\alpha}/\sigma$ данного распределения (табл.16.2)

Таблица 16.2.

Значения коэффициента k для различных законов распределения

Закон распределения	k	Вид распределения	k
Нормальное (Гаусса)	2,07	Равномерное	1,73
Треугольное (Симпсона)	2,02	Арсинусоидальное	1,11
Лапласа	1,93	Дискретное двухзначное	0
Стьюдента (число степеней свободы – 4)	1,90	Коши	0

16.4. О самоорганизации трибосистем

В состояниях самоорганизации трибосистемы проявляют адаптивное поведение, выражающееся в наименьших потерях энергии и (или) максимально возможной износостойкости.

Структура трибосистемы как открытой динамической системы, в частности, характеризуется структурой входящих материалов (зеренной, симметрии решетки, распределения компонентов, электронных конфигураций и т.п.), т.е. структурой частиц и структурой распределений возбужденных состояний - квазичастиц (дислокаций, фононов, электромагнитных волн и т.п.).

Понятия саморегулирования (динамического равновесия процессов) и адаптивного саморегулирования (с изменяющейся структурой регулятора) могут быть конструктивно использованы только при наличии модели, включающей: объект регулирования, регулятор, целевую функцию и параметр обратной связи. Наблюдая за эволюцией системы, можно отметить такие основные признаки синергичности (табл.16.3).

Таблица 16.3

Признаки синергичности систем

№	Вид представления или наблюдения эволюции системы	Признак синергичности
1.	Имеется уравнение движения или кинетики определяющего параметра	Возникновение неустойчивости типа бифуркации и автоколебательного или автоволнового решения.
2.	Введен параметр порядка, непрерывно изменяющийся по потоковой координате.	Возникновение макрофлуктуаций параметра порядка и кинетические фазовые переходы.
3.	Имеется физико-статическое (микрокинетическое) описание.	Необходимость учета новых иерархических уровней системы, обусловленных включением в нее воздействий или релаксационным осреднением до мезоуровня.
4.	Наблюдается молекулярная, атомная, дислокационная структура частиц.	Возникновение крупномасштабного динамического упорядочения: гидродинамические ячейки, концентрационные волны и т.п.
5.	Имеется модель автокаталитического цикла (гиперцикла).	Возможность информационно-кодowego описания.
6.	Изменяется энтропия возбужденной подсистемы частиц.	Происходит скачкообразное уменьшение энтропии или минимизации ее производства.

Для того, чтобы в зазоре между движимыми относительно Друг друга поверхностями смазочный слой мог под нагрузкой сохранить неразрывность, зазор должен самопроизвольно стать клиновидным.

При этом распределение скоростей истечения масла по толщине зазора и давления вдоль зазора становятся нелинейными. Постоянная толщина зазора возможна при соответствующем распределении температуры вдоль него (тепловой клин).

Саморегулирование реализуется также путем снижения вязкости и потерь на трение и возрастания вязкости от давления.

16.5. Системный анализ трибологических повреждений.

Можно выделить следующие основные классы повреждений механического оборудования:

1. Повреждения в процессе эксплуатации;
2. Усталостные повреждения;
3. Повреждения из-за превышения допустимой деформации;
4. Коррозионные повреждения;
5. Повреждения в результате изнашивания;
6. Повреждения вследствие схватывания;
7. Повреждения, связанные с ошибками на стадиях проектирования, изготовления и сборки.

С математической точки зрения повреждения, а также надежность работы оборудования могут быть описаны с помощью вероятностных функций, т.е. экспоненциальных функций Вейбула, применительно к рассматриваемой системе и к заданным рабочим условиям.

Таким образом, наличие повреждения определяется исходя из того, нормально или ненормально функционирует конкретная система, т.е. повреждение не рассматривается как абсолютный фактор. (табл. 16.4)

Таблица 16.4

Трибологические повреждения

Условия, приводящие к повреждению	Избыточная нагрузка; ударные нагрузки; вибрация; высокие температуры; неправильный выбор материалов; неправильная сборка; плохая подгонка; рассогласование; неподходящая смазка; неправильная подача смазок к трущимся поверхностям; несоответствующая толщина смазочной пленки; наличие воды в смазке; загрязнение смазки; наличие примесей.
Диссипативные процессы	Циклические напряжения; пластическое течение; нагрев, циклический нагрев; усталость (распространение трещины); адгезия; резание; диффузия материала; коррозия.
Виды повреждений	Неадекватное трение; неустойчивость; деформация; разрушение; повреждение поверхности; износ; схватывание.

Анализируя повреждения, можно представить в общем виде схему расчёта надежности трибосопряжений, например, по износу (рис.16.4)

Приработка является неизменным периодом работы трущихся сопряжении. По мнению ряда авторов, приработка в значительной степени определяет безотказность узла трения в эксплуатации, его долговечность. Однако в большинстве исследований приработка рассматривается как неуправляемый процесс и его изучение проводится при постоянных внешних условиях, не учитываются кинетические способности приработки, зависимость от температуры» условий и режимов трения.



Рис. 16.4 . Общая схема расчёта надёжности трибосопряжений по износу

Изменение приращения температуры оказывает первостепенное влияние на вязкость и пьезокоэффициент смазки, которые определяют «динамическую» толщину смазочной пленки. Процессы трансформации поверхностного слоя прирабатывающихся поверхностей являются реакцией на ужесточение трения в результате изменяющихся внешних параметров. Направление процессов в контакте (приспособляемость-заедание) обусловлено физической и химической природой защитных пленок, условиями смазки, которые определяются диапазоном изменения текущих значений параметров внешнего воздействия. Для обеспечения эффективной приработки параметры внешнего воздействия должны назначаться таким образом, чтобы:

а) не наблюдалось необратимых процессов, сопровождающихся повышением коэффициента трения, т.е. внешними воздействиями должны быть созданы такие условия прохождения приработки, когда сопряжения не получают повреждений поверхностей и интенсивно реализуются процессы приспособляемости;

б) не имели место режимы жидкостной смазки, когда поверхности трения полностью разделены слоем смазки и приработочные процессы неосуществимы.

Влияние воздействия обеспечивают эффективную приработку в том случае, если работа сопряжения будет проходить в режиме устойчивого смешанного режима трения.

Например, сопряжения полностью приработанного дизельного двигателя при номинальной нагрузке работают при максимальном уровне реализуемой в данных условиях трения нагрузочной способности. При этом внешнюю характеристику дизеля, являющуюся совокупностью предельно возможных режимов работы, можно рассматривать как границу заедания его сопряжении (или наиболее нагруженных из них). Для практики большое значение имеет задача оптимизации режимов приработки движущихся деталей после изготовления и ремонта машин.

16.6. Определение зависимости между скоростью энтропии и интенсивностью отказов узлов трения.

Приращение энтропии представляется в виде обратимой и необратимой составляющих.

При этом скорость роста необратимой составляющей называют производством энтропии. В стационарном состоянии у необратимых процессов в тех случаях, когда рассеяние энергии пропорционально квадрату скорости деградиционных процессов, производство энтропии минимально. Когда необратимая составляющая энтропии достигает некоторой критической величины, система переходит в новое состояние по критическому пути и производство энтропии стремится к максимуму.

Вся кривая скорости роста энтропии по времени имеет U – обзорный характер. Такой характер изменения по времени имеют скорости протекания многих деградиционных процессов: скорость ползучести, скорость роста трещины и др. Такой же характер изменения имеет и интенсивность отказов в теории надежности.

Одинаковый характер изменения во времени указанных характеристик дает основание высказать предположение, что интенсивность отказов и скорость роста энтропии связаны между собой и в простейшем случае

$$\lambda(t) = \frac{\dot{S}(t)}{S_{кр}} \quad (16.23)$$

где $\lambda(t)$ - интенсивность отказов;

$\dot{S}(t) = \frac{ds_i}{dt}$ - скорость роста необратимой составляющей энтропии;

$S_{кр}$ - критическое значение энтропии, при достижении которой наступает отказ.

Вероятность безотказной работы в этом случае записывается так:

$$P(t) = \exp \left\langle - \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right\rangle = \exp \left[\frac{\int_0^t \dot{S}(\tau) d\tau}{S_{кр}} \right] \quad (16.24)$$

В общем случае зависимость между интенсивностью отказов и скоростью роста энтропии произвольная, поэтому

$$P(t) = \exp \left[- \frac{1}{C(t)} S(t) \right], \quad (16.25)$$

где $S(t) = \int_0^t \dot{S}(\tau) dt$; $C(t)$ - параметр, зависящий от времени и имеющий размерность энтропии.

Полученные выражения позволяют расчетным путем оценивать вероятностные показатели надежности, если известно как выражается скорость роста энтропии через скорости конкретных деградиационных процессов.

16.7. О трещинах на поверхностях пар трения.

Экспериментальные исследования показывают, что глубина микровыкрашивания и подповерхностной области распространения трещин составляет 30-60 мкм.

Место возникновения и вид усталостной трещины зависят от микроструктуры испытываемого образца, напряженного состояния в контактной зоне, а также микро- и макрогеометрии поверхности трения. В микроструктурном плане зарождение микротрещин происходит вдоль полос скольжения в результате движения дислокаций, по границам зерен или вдоль поверхностей раздела включений. Микроструктура закаленной стали состоит из мартенсита отпуска, нерастворенных частиц карбидов и остаточного аустенита. После испытаний образцов на циклическое нагружение в них обнаруживается значительно деформированный слой. Этот слой свидетельствует о наличии в подповерхностной области пластических деформаций, дислокационных элементов и микротрещин. Микротрещины зарождаются по границам частиц карбидов, в мартенситной матрице и даже вдоль границ исходного аустенита. Формирование этих микротрещин происходит в основном на свободной поверхности циклически нагружаемых тел, в местах концентрации пластических деформаций и, следовательно, напряжений.

Эта область распространяется на глубину 0,2-0,7 мкм от контактной поверхности. Очень близко и параллельно этой поверхности расположены микротрещины, как это показывают исследования на сканирующем электронном микроскопе. Эти микротрещины зарождаются в ранней стадии циклических испытаний и затем развиваются в большие трещины.

За критерий зарождения трещины, принимают число циклов нагружения N_i , при котором энергия, накопления движущимися дислокациями, достигает критической величины.

В упрощенном виде этот критерий имеет вид:

$$N_i = \frac{AW_C}{(\Delta\sigma - 2G_K)^2} \quad (16.26)$$

где W_C – удельная энергия разрушения (отнесенная к единице площади); $\Delta\sigma$ – амплитуда напряжений сдвига; G_K – напряжение трения; A – функция, зависящая от материалов контактной поверхности и типа начальной трещины в однородной среде. Величина A удовлетворяет равенствам:

$$A = \begin{cases} \frac{4\sigma h}{\pi(1-\nu)\ell} \\ \frac{2\sigma h}{\ell} \\ \frac{4Gh(Gh + G_i)h^2}{G_i(h + \ell)^2 R} \end{cases} \quad (16.27)$$

где Gh и G_i – модули сдвига однородной среды; ν – коэффициент Пуассона; ℓ – полудлина линии скольжения; R – радиус включения.

Экспериментальные исследования показывают, что большинство трещин на контактной поверхности, имеющих длину от 0,5 мкм до нескольких мкм, перестают расти или исчезают из-за износа материала при скольжении. Развившиеся до 20-40 мкм, т.е. достаточно большие трещины, сохраняются на этой поверхности. долговечность, определяемая зарождением усталостной трещины, более чувствительна к контактному давлению, чем число циклов нагружения, характеризуемое ее распространением, т.е. в случае близости локального напряжения к напряжению трения долговечность по критерию зарождения трещины является доминирующим параметром контактного усталостного нагружения.

Однако, при относительно больших контактных напряжениях на первый план выступает распространение усталостных трещин, зависящее от вязкости разрушения и его сопротивлению циклически нагружаемого материала.

16.8. Определение работоспособности шестеренных узлов гидроприводов машин по показателям энтропии.

Общая формула определения работоспособности имеет вид:

$$\frac{PVf}{T_f} = \frac{2kN_D}{h} U_i''(\sigma_0 T_f) \exp\left(-\frac{U_i''(\sigma_0 T_f)}{kT_f}\right) \operatorname{sh}\left(\frac{(\alpha\sigma_i^2)^A + U^A e_0}{2kT_f}\right) + S^* \dot{V}_n \quad (16.28)$$

Выражения компонентов главных напряжений при совместном действии вертикальных P и касательных T сил, определяется как:

$$\begin{aligned} \sigma_x = P_0 \left[f \left(2e^{-\alpha} \cos \beta - \sin \beta \operatorname{sh} \alpha \frac{\sin 2\beta}{\operatorname{ch} 2\alpha - \cos \beta} \right) - e^{-\alpha} \sin \beta + \right. \\ \left. + \sin \beta \operatorname{sh} \alpha \left(1 - \frac{\operatorname{sh} 2\alpha}{\operatorname{sh} 2\alpha - \cos 2\beta} \right) \right] \end{aligned} \quad (16.29)$$

$$\sigma_y = 2\mu p_0 e^{-\alpha} [f \cos \beta - \sin \beta] \quad (16.30)$$

$$\sigma_z = p_0 \left[f \operatorname{sh} \alpha \sin \beta \frac{\sin 2\beta}{\operatorname{ch} 2\alpha - \cos 2\beta} - e^{-\alpha} \sin \beta - \sin \beta \operatorname{sh} \alpha \left(1 - \frac{\operatorname{sh} 2\alpha}{\operatorname{ch} 2\alpha - \cos 2\beta} \right) \right] \quad (16.31)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - главные напряжения;

p_0 - величина удельного давления в центре контактной площадки;

e - эксцентриситет эллипса контакта;

$f = \frac{T}{p}$ - коэффициент трения;

μ - коэффициент Пуассона;

α, β - эллиптические координаты, которые с декартовыми координатами связаны следующими зависимостями:

$$x = b \operatorname{ch} \alpha \cos \beta$$

$$z = b \operatorname{sh} \alpha \sin \beta$$

$$\sigma_x = p_0 (f - 1) = -1284 (0.3 - 1) = -899 \text{ мПа}$$

если $\alpha = 0, \beta = \pi/2$, тогда $\sigma_y = -2\mu p_0 = -2 \cdot 0.3 \cdot 1284 = -770 \text{ мПа}$

$$\sigma_z = -p_0 = -1284 \text{ мПа}$$

Шаровой тензор σ_0 и интенсивность напряжений σ_i определим

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = \frac{899 + 770 + 1284}{3} = -984 \text{ мПа}$$

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_y - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2]^{1/2} = \\ &= \frac{1}{1.41} [(-770 + 899)^2 + (-899 + 1284)^2 + (-1284 + 770)^2]^{1/2} = 465 \text{ мПа} \end{aligned}$$

Величина p_0 определяется из соотношения

$$p_0 = m_0 \sqrt[3]{\frac{p_{\text{дин}} E^2}{R^2 \cdot 10^6}} = 0.459 \sqrt[3]{\frac{112000 \cdot 2.1^2 \cdot 10^{10}}{0.475^2 \cdot 10^6}} = 1284 \text{ мПа}$$

где $m_0 = 0.452$ (при $r/R = 0.632$)

$p_{\text{дин}}$ - вертикальная динамическая нагрузка;

$E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ мПа}$ - модуль упругости.

$$p_q = \sum (1 + 0.012 V_i) q_{0-i} \varepsilon_i,$$

где V_i - скорость;

q_{0-i} - нагрузка;

ε - доля по весу нагрузок q_{0-i} от общего веса;

На базе энтропийного критерия можно представить аналитическое выражение для расчета интенсивности изнашивания пар трения

$$I = \left\{ \int_0^{\delta} \{p[S] - \Phi[S]\} dx \right\}^2 / p[\delta S] V (S^* - S_0), \quad (16.32)$$

где I - интенсивность изнашивания;

δ - характерный размер температурного распределения по нормали к поверхности трения;

$p[S]$ - производство энтропии;

$\Phi[S]$ - поток энтропии;

$P[\delta S]$ - производство избыточной энтропии от флуктуационных процессов на контакте;

V - скорость скольжения;

S^* - критический уровень плотности энтропии;

S_0 - исходная плотность энтропии.

Величина энтропии на любой стадии процесса определяется исключительно термодинамическими параметрами.

Величина критической плотности внутренней энергии, соответствующей моменту разрушения

$$Ue^* = \Delta H_S - \int_T^{T_f} C_p dT = 10500 - 3.51(600 - 298) = 9440 \text{ мДж/м}^3$$

здесь $\Delta H_S = 10500 \text{ мДж/м}^3$ - энтальпия плавления хромо-никелевой стали;

$C_p = 3.51 \text{ мДж/м}^3 \cdot \text{K}$ - теплоемкость хромо-никелевой стали;

$T_f = 600 \text{ K}$ - температура на контакте

Определение величины внутренней энергии в исходном состоянии Ue_0

$$Ue_0 = Ue^* \left(\frac{\sigma_T}{S_0^*} \right)^2 = 9400 \left(\frac{688}{1416} \right)^2 = 2229 \text{ мДж/м}^3$$

где σ_T - предел текучести хромо-никелевой стали;

S_0^* - истинное сопротивление материала сдвигу.

$$S_0^* = S_K f(\psi_K) = 1459 \cdot 0.9706 = 1416 \text{ мПа}$$

Определение коэффициента перенапряжений на межатомных связях k_σ

$$k_\sigma = \frac{(6G Ue^*)^{1/2}}{S_0^*} = \frac{(6 \cdot 83800 \cdot 9440)^{1/2}}{1416} = 48.65,$$

где $G = 83800 \text{ мПа}$ - модуль сдвига

Определение коэффициентов α и β :

$$\alpha = \frac{K^2 \sigma}{6 \sigma} = \frac{(48.65)^2}{6 \cdot 83800 \cdot 10^6} = 4.707 \cdot 10^{-9} (\text{Па})^{-1};$$

$$\beta = \alpha \frac{3\sigma}{K} = \alpha \frac{9(1-2\mu)}{2(1+\mu)} = 4.707 \cdot 10^{-9} \frac{9(1-2 \cdot 0.3)}{2(1+0.3)} = 6.517 \cdot 10^{-9} (\text{Па})^{-1}$$

Расчет членов уравнения

$$\left[\frac{\alpha \sigma_i^2 V_0}{2 kT} \right]^A = \frac{4.707 \cdot 10^{-9} (465 \cdot 10^6)^2 \cdot 1.178 \cdot 10^{-29}}{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 600} = 0.74 \text{ в расчете на один}$$

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град - постоянная Больцмана;

$V_0 = 1.178 \cdot 10^{-29}$ м³ - объем, занимаемый одним атомом

$$\frac{U^A e_0}{2kT} = \frac{2.626 \cdot 10^{-20}}{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 600} = 1.586,$$

где $U^A e_0 = U e_0 V_0 = 2229 \cdot 10^6 \cdot 1.178 \cdot 10^{-29} = 2.626 \cdot 10^{-20}$ Дж/атом

$U^A e_0$ - плотность внутренней энергии стали в исходном состоянии в расчете на один атом.

Для стали X13H16B предельное значение приращения плотности энтропии при $t = 700$ °С составило $\Delta S^* = 7.8 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹ · м⁻³

Одним из первых энтропийных подходов к процесса трения и изнашивания был предложен Бершадским Л.И. «Проблемы трения и изнашивания» Вып.16, 1979, с. 14-21

$$S^* = S_0 + \int_0^{t^*} \sum \frac{\omega_i(t, G)}{G i(t)} dt,$$

где S^* - энтропия изменения агрегатного состояния вещества, например, плавления (полной деградации), рассматриваемая как физическая константа материала;

S_0 - запас энтропии при температуре $\theta > 0$, зависящий также от предыстории наполнения повреждений;

t^* - время до разрушения;

ω_i - функция рассеяния;

σ_i - параметр, сопряженный с i -ой составляющей производства энтропии.

Функция $\omega(t, G)$ определяется обратной связью.

Вопросы по теме:

1. Как измеряется энтропия?
2. Как определяется вероятность Больцмана?
3. Дать понятия энтропии и производства энтропии
4. Изложить метод оценки работоспособности трибосопряжений по изменениям энтропии.
5. Охарактеризовать положительные стороны в энтропийном подходе оценки работоспособности узлов трибосопряжений
6. Как определяется энтропийное значение погрешности?

Вопросы по самостоятельной работе:

1. Выполнить реферат по прогнозированию износостойкости трибосопряжений по изменениям энтропии.

Литература

1. Вилсон А. Д. Энтропийные методы моделирования сложных систем. М., 1978.
2. Мартин Дж. Математическая теория энтропии. М., 1989.
3. Пономарева О.М., Моисеенко Ю.Ю. Энтропия динамических систем машин. Материалы республиканской научно-технической конференции «Проблемы наземных транспортных систем» Ташкент, ТаШИИТ, (17-19 мая), 2007, с.47-52
4. Пономарева О.М., Лебедев О.В., Аннакулова Г.К., Моисеенко Ю.Ю. Взаимосвязь между устойчивостью систем и приращением энтропии. Материалы Международной научно-практической конференции “Innovation – 2007”. Ташкент. Изд. «Yangi asr avlodi», 2007, с. 335-336
5. Пономарева О.М., Халмухамедов А.С., Лебедев О.В. Оценка работоспособности узлов гидропривода ААМН по изменениям энтропии. Труды Академии Вооруженных Сил Республики Узбекистан, Ташкент, 2006 г., вып. 4, с.15-22

17. Основы очистки рабочих жидкостей от механических загрязнений

Механическими загрязнениями считаются инородные включения, диспергированные в жидкости в виде взвеси и влияющие на её эксплуатационные свойства.

Количество, структура, гранулометрический и химический состав механических загрязнений изменяются в широких пределах.

Загрязнения могут быть производственными, операционными и эксплуатационными.

Примеси, загрязняющие масло, бывают двух видов: органические и неорганические. Органические состоят из продуктов неполного сгорания топлива и продуктов термического разложения и окисления масла, а неорганические представляют собой смесь металлических частиц, появляющихся из-за абразивного износа деталей, пыли, попавшей в систему смазки, и сработавшихся зольных присадок.

Чтобы усовершенствовать фильтр и заставить его работать дольше, предлагается совместно с бумажной шторой использовать объёмно-капиллярную фильтрующую штору из синтетического волокна. Такая штора представляет собой многослойную обмотку из полиамидной нити, причём внутренние слои имеют большую плотность намотки, чем внешние.

В результате получается фильтрующий элемент с анизотропными, то есть неодинаковыми в различных направлениях, свойствами, которыми к тому же можно управлять в процессе изготовления.

Инородные частицы в такой шторе движутся не по радиусу, как в бумажной, а по спирали — вдоль нити. По пути они неизбежно будут тормозиться и в результате в каком-то месте прилипнут к ней. В объёмном фильтре задерживается до 95% частиц размером от 8 мкм. Переменная плотность намотки позволяет «ранжировать» частицы по размерам, погребая их на различной глубине: крупные — ближе к периферии, мелкие — ближе к центру. Но на поверхности их точно не окажется.

Удельная фильтрующая поверхность у объёмного фильтрующего элемента гораздо больше, чем у бумажного, поэтому он будет служить чем-то вроде аккумулятора грязи, имеющего очень большую ёмкость. В результате масло в двигателе оказывается более чистым и на поверхности бумажного фильтра накапливается меньше загрязнений.

В нефтяных маслах присутствуют также загрязнения органического происхождения, главным образом продукты окисления углеводородов, которые могут попадать в товарные топлива и масла (табл. 17.1).

В гидроприводах для рабочих жидкостей чистота соответствует 8 – 14 классам, а класс чистоты определяется по уровню загрязнённости:

класс чистоты	...	...	...	...	8	9	10	11	12	13	14
индекс загрязнённости	...	105	210	415	830	1645	3275	6520			

Величину индекса загрязнённости определяют по формуле

$$Z = 0.001 (n_{10} \cdot 10 + n_{25} \cdot 25 + n_{50} \cdot 50 + n_{100} \cdot 100 + n_{200} \cdot 200 + n_b \cdot 400),$$

где Z – индекс загрязнённости;

n_{10} , n_{25} , n_{50} , n_{100} , n_{200} , n_b – соответственно число частиц в 100 см^3 в интервалах размеров 5 – 10, 10 – 25, 25 – 50, 50 – 100, 100 – 200 мкм и волокон.

Таблица 17.1

Классы частиц характеризуются следующими нормами

класс	Допустимое число частиц в 100 см^3 размером						
	5 – 15	15 – 25	25 – 50	50 – 100	> 100	> 5 (общее количество)	> 25 (общее количество)
8	32000	2850	506	90	16	19462	612
9	64000	5700	1012	180	32	38924	1224
10	128000	11400	2024	360	64	77849	2440
11	256000	22800	4048	720	128	155698	4898
12	512000	45600	8096	1440	256	311396	9796
13	1024000	91200	16192	2880	512	622782	19582
14	2048000	182400	32400	5760	1024	1254564	39164

При ламинарном режиме фильтрация описывается уравнением Дарси

$$Q = K_{\phi} \cdot S \cdot \frac{\Delta h}{H}, \quad (17.1)$$

где Q – пропускная способность перегородки, $\text{м}^3/\text{с}$;

K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, $\text{м}/\text{с}$;

S – площадь перегородки, м^2 ;

Δh – потеря напора на перегородке;

H – толщина перегородки, м .

$$K_{\phi} = K_{\Pi} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \frac{g}{\mu}, \quad (17.2)$$

где K_{Π} – коэффициент проницаемости, м^2 ;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;

g – ускорение свободного падения, $\text{м}^2/\text{с}^2$;

μ – динамическая вязкость жидкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Тогда уравнение Дарси можно представить в виде:

$$Q = K_{\Pi} S \left(\frac{\Delta p}{\mu H} \right), \quad (17.3)$$

где Δp – перепад давлений, Па .

K_{Π} для перегородок, состоящих из сферических частиц одинакового диаметра можно рассчитать по формуле:

$$K_{\Pi} = \frac{d_{\text{ш}}^2 (\Pi')^2}{96 (1 - \Pi)}, \quad (17.4)$$

а для перегородок, имеющих поры в виде параллельного пучка капилляров одинакового диаметра, по формуле

$$K_{\Pi} = \pi d_{\text{к}}^4 \frac{n}{128}, \quad (17.5)$$

где $d_{\text{ш}}$ – диаметр сферической частицы, м ;

d_k – диаметр капилляра, м;

n – количество пор на величину поверхности, $1/m^2$;

$\Pi = V_{\Pi}/V$ – пористость перегородки;

V_{Π} – объем внешних (сквозных и тупиковых) пор, m^3 ;

V – объем перегородки, m^3 ;

$\Pi' = S_{\Pi}/S$ – просветность перегородки;

S_{Π} – площадь поперечного сечения внешних пор, m^2 .

подавляющее большинство фильтрующих материалов имеет поры неправильной формы и переменного сечения, расположенные произвольно, поэтому коэффициент проницаемости этих материалов, возможно, определить только экспериментально.

Фильтрация при постоянной скорости осуществляется тогда, когда для подачи жидкости на пористую перегородку применяют насосы объемного типа (шестеренчатые, поршневые и т.д.), в этом случае перепад давлений на пористой перегородке будет возрастать.

При подаче масла объемными насосами может происходить и фильтрация при постоянном перепаде давлений, если давление в системе достигнет предельного значения, при котором открывается редукционный клапан насоса.

Эксперименты показали, что при уменьшении частоты вращения пластинчатого насоса на 40% диапазон устойчивой работы насоса по уровню вязкости РЖ увеличивается от 600-700 сСт до 2000-2100 сСт, т.е. примерно в 3 раза.

В зависимости от типа фильтрующего элемента перепад давления при номинальном расходе колеблется от 10,6 до 17,6 кПа, а полнота отсева от 77 до ~ 99,8%.

Для оценки грязеемкости испытуемых фильтроэлементов использовался искусственный загрязнитель – кварцевая пыль с удельной поверхностью $10500 \text{ см}^2/\text{г}$.

При фильтрации жидкости через пористую перегородку изменение скорости фильтрации будет характеризоваться критерием гомохронности

$$H_o = V_{\phi} \tau / e = V_{\phi} \tau / \sqrt{K_{\Pi}}, \quad (17.6)$$

где τ – время фильтрации, с.

У несжимаемых материалов поры перегородки не деформируются при изменении давления, а у сжимаемых в этом случае наблюдается деформация пор и уменьшение их живого сечения, что приводит к изменению фильтрационных показателей, в первую очередь удельной пропускной способности. подавляющее большинство гибких фильтрующих материалов изготавливают из разнообразных волокон, применяемых как в чистом виде, так и в различных сочетаниях.

Масляные фильтры служат для удаления из масла продуктов износа металлов и окисления масла (нагар, смолистые вещества, пыль, частицы

оставшиеся после изготовления узлов и агрегатов гидросистемы). По принципу действия все фильтры делятся на механические, поглощающие (емкостные), гидродинамические и магнитные.

Механические фильтры по характеру набивки различают сетчатые (поверхностные), щелевые и пластинчатые и используют в качестве фильтров грубой очистки. К числу механических фильтров относят также войлочные, хлопчатобумажные, текстильные и бумажные, применяемые как для грубой так и для тонкой очистки.

Поглощающие фильтры не только задерживают механические примеси, но и поглощают кислоты, щелочи, воду и другие продукты, производя тем самым глубокую очистку масла. В качестве фильтрующих элементов служат войлок, пряжа и некоторые другие материалы со специальными пропитками, а также смеси из окиси алюминия (30-35%), боксита (50%), присадок марганца и серы (1,5%) и наполнителя - шлаковой ваты (15-20%). Поглощающие фильтры применяют в качестве фильтров тонкой очистки. При засорении фильтрующий элемент заменяют. Масло очищается фильтром до тех пор, пока грязь не заполнит всей полости. После этого фильтрация масла резко ухудшается и отработавший фильтр заменяют новым, поскольку поток масла проходит через предохранительный клапан, минуя очистку фильтрующими элементами.

Для изготовления фильтрующих материалов используют волокна органического и неорганического происхождения, как встречающиеся в натуральном виде, так и изготавливаемые химическим способом. Волокна широко используют для изготовления тканей, нетканых текстильных материалов, бумаги и картона, войлока и фетра, различных волокнистых матов, используемых в качестве фильтрующих материалов.

В последнее время для очистки жидкостей широко применяют фильтровальные ткани. Они имеют разнообразные свойства, которые зависят от строения ткани, определяемого в свою очередь, структурой и диаметром нитей, характером их переплетения, плотностью и толщиной ткани. Для изготовления фильтровальных тканей могут применяться не только моноволокна, но и многофиламентарные нити, состоящие из двух и более моноволокон, скрученных между собой.

Нетканые текстильные материалы могут изготавливаться из натуральных, химических волокон и их смесей.

Они имеют гораздо более низкую стоимость по сравнению с тканями и обладают лучшими фильтрационными свойствами, так как все поровые отверстия в них образуются не относительно толстыми нитями, а волокнами гораздо меньшего диаметра, в то время как в тканях площадь отверстий, образуемых непосредственно волокнами, составляет всего 10% от всей площади суммарного проходного сечения пор.

Волокна в нетканых материалах расположены неупорядоченно и могут фиксироваться связующими веществами (склеивание) или термообработкой и прессованием легкоплавких волокон.

К нетканым материалам можно отнести фильтрующие материалы типа ФП (фильтры Петрянова), представляющие собой равномерный по толщине слой ультратонких полимерных (полихлорвиниловых или ацетат целлюлозных) волокон, которые у одних материалов прочно связаны между собой в местах сопротивления, у других располагаются свободно относительно друг друга, а у третьих связаны между собой только в наружных слоях. В зависимости от вида полимера, из которого изготовлены волокна, материалы типа ФП обладают стойкостью к тем или иным рабочим жидкостям. Размер пор составляет от 0.6 до 12 мкм. Материалы типа ФП имеют сравнительно невысокую механическую прочность, особенно при перегибе, поэтому для очистки масел их применяют, как правило, на подложке из другого фильтрующего материала с крупными порами, который придает конструкции необходимые прочностные свойства.

Металлокерамические материалы, применяемые для фильтрации, получают спеканием или прессованием металлических порошков (углеродистых и нержавеющей сталей, бронзы, вольфрама, титана, алюминия и т.д.).

Металлические порошки могут состоять из частиц различной формы (сферической, округлой, дендритной, тарельчатой, волокнистой, лепестковой и т.д.).

Форма частиц зависит от свойств металла и способа получения порошка, оказывая, в свою очередь, влияние на эксплуатационные показатели фильтрующего металлокерамического материала.

Свободным спеканием можно получить только изменения небольшого размера. Для изготовления более крупных фильтрующих элементов применяют прессование. При этом равномерную пористую структуру материала обеспечивает гидростатическое прессование, при котором для всестороннего обжата металлического порошка, заключенного в эластичную оболочку, применяют жидкость. В этом случае частицы порошка при прессовании не перемещаются и пористость изделия одинакова во всех его сечениях.

В качестве фильтрующего элемента может быть применен и керамический материал, изготавливаемый спеканием зернистых минеральных частиц (так называемого наполнителя) с добавлением связующего вещества или без него.

Гидравлическая характеристика фильтрующего материала представляет собой зависимость его удельной пропускной способности, т.е. количества жидкости, проходящей через единицу поверхности материала в единицу времени, от перепада давления на фильтрующем материале (рис 17.1).

$$q = f(\Delta p),$$

где q – удельная пропускная способность, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

При снятии гидравлической характеристики перепад давления изменяют через равные интервалы (обычно 10 или 20 кПа). Пример гидравлической характеристики для различных фильтрующих материалов приведен на рис.17.1.

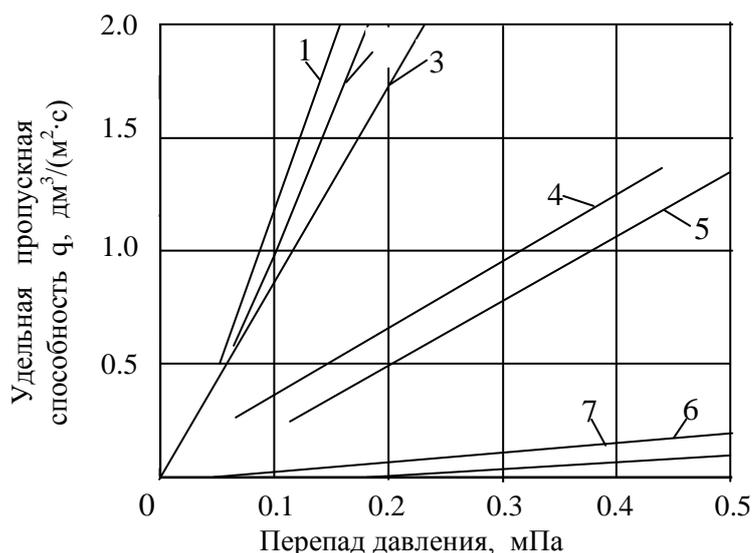


Рис.17.1 Гидравлические характеристики фильтрующего материала при вязкости жидкости 154 мм²/с

1 – нетканый материал (70% хлопка и 30% лавсана) без пропитки; 2 – нетканый материал из хлопка с пропиткой; 3 – лавсан; 4 – хлопок с пропиткой латексом; 5 – анид; 6 – бумага АФБ-5; 7 – полипропилен.

Полнота фильтрования является количественным показателем процесса очистки, по которому оценивают, какая доля загрязнений, содержащихся в жидкости, задержана фильтрующим материалом. Коэффициент полноты фильтрования определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{(G_1 - G_2)}{G_1}, \quad (17.7)$$

где G_1 и G_2 – содержание загрязнений в жидкости соответственно до и после фильтрования, Г/м³.

Содержание загрязнений в жидкости определяется весовым методом.

Тонкость фильтрования характеризует качественный эффект процесса очистки рабочей жидкости от загрязнений при ее прохождении через фильтрующий материал.

В общем случае тонкость фильтрации определяется следующими взаимосвязанными показателями: абсолютной тонкостью фильтрования, величина которой численно равна минимальному размеру частиц, прошедших через фильтрующий материал, номинальной тонкостью фильтрования, величина которой численно равна минимальному размеру частиц, прошедших через фильтрующий материал с заранее установленным коэффициентом отсева, который численно равен отношению числа задержанных фильтрующим материалом частиц. В каком-либо интервале размеров ко всему числу частиц, имеющих эти же размеры и содержащихся в жидкости до фильтрования, коэффициент отсева частиц определяют по формуле:

$$n = \frac{(k_1 - k_2)}{k_1}, \quad (17.8)$$

где k_1 и k_2 – число частиц в данном интервале размеров соответственно до и после фильтрования, шт/см³.

Тонкость фильтрования материала может значительно ухудшиться в процессе работы, если материал не обладает достаточной стойкостью к фильтруемой жидкости.

Масса загрязнений, задержанных на единице площади фильтрующего материала за время повышения перепада давлений от начального до предельно допустимого, характеризуется грязеёмкостью. Для определения грязеёмкости служит формула:

$$\Delta G = G_{\phi} - G_{\phi_0}, \quad (17.9)$$

где ΔG - масса загрязнений, задержанных на единице площади за время испытаний;

G_{ϕ_0} и G_{ϕ} – масса образца материала соответственно до и после испытаний, отнесенная к единице площади.

Показатель грязеёмкости может служить лишь для качественной сравнительной оценки различных фильтрующих материалов.

Показатель, характеризующий уменьшение во времени удельной пропускной способности фильтрующего материала в процессе фильтрования принято называть фильтруемостью. На рис.17.2 показано изменение показателя фильтруемости для четырех типов материала.



Рис.17.2 Фильтруемость жидкости с вязкостью 1.25 мм²/с через различные материалы

Эти материалы обеспечивают тонкость фильтрации 1 – 5 и 5 – 10 мкм.

Тонкость отсева δ определяет: размеры и количество частиц, пропущенных фильтром к трущимся парам гидропривода и трансмиссии; гидравлическое сопротивление фильтра; срок службы до замены фильтроэлемента (ГОСТ 7155 – 75).

При переводе тракторов на масла более высокого качества, позволяющие увеличить срок и службы до замены, тонкость отсева фильтров может быть увеличена и приближена к оптимальной, равной 30 – 40 мкм.

Серийные фильтры имеют тонкость отсева 25 мкм, которую принимаем за исходную.

Масло и фильтрующие элементы заменяются при перепаде давления на фильтре 0.08 мПа, соответствующем начала открытия перепускного клапана, т.е. ресурса до загрязнения фильтрующих элементов

$$P_{\phi} = a\delta - b$$

где a и b – эмпирические коэффициенты: $a = 10 \div 20$; $b = 200$;

δ – номинальная тонкость отсева фильтра, мкм

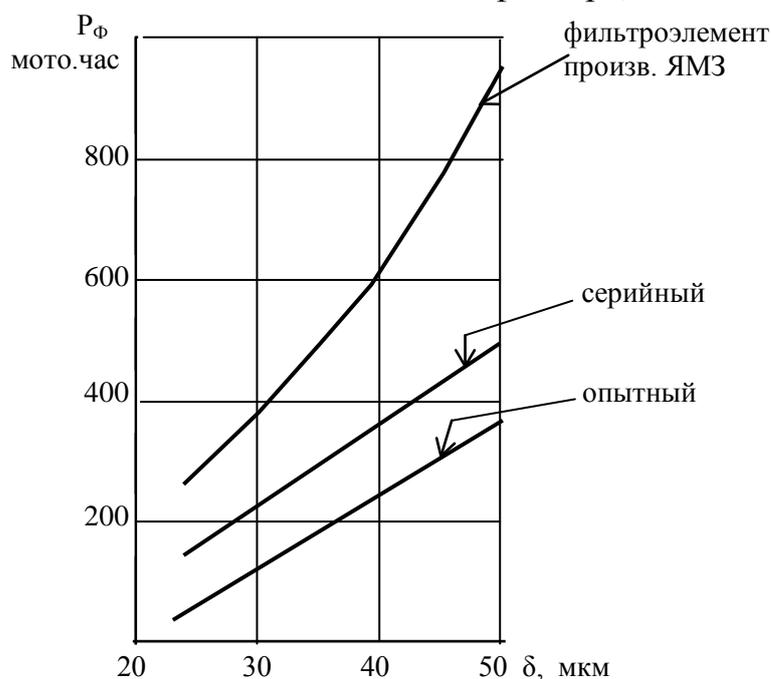


Рис. 17.3. Зависимость ресурса полнопоточного фильтрующего элемента до замены от тонкости отсева при эксплуатации трактора

Изменение тонкости отсева фильтров с 25 до 50 мкм (т.е. в два раза) приводит к увеличению концентрации механических примесей в масле до 1.5 раз, в то время как остальные параметры масла изменяются не более чем на 10%, рис.17.3.

Основные виды испытаний для определения физико-механических свойств фильтрующих материалов можно проиллюстрировать следующим образом (рис.17.4)

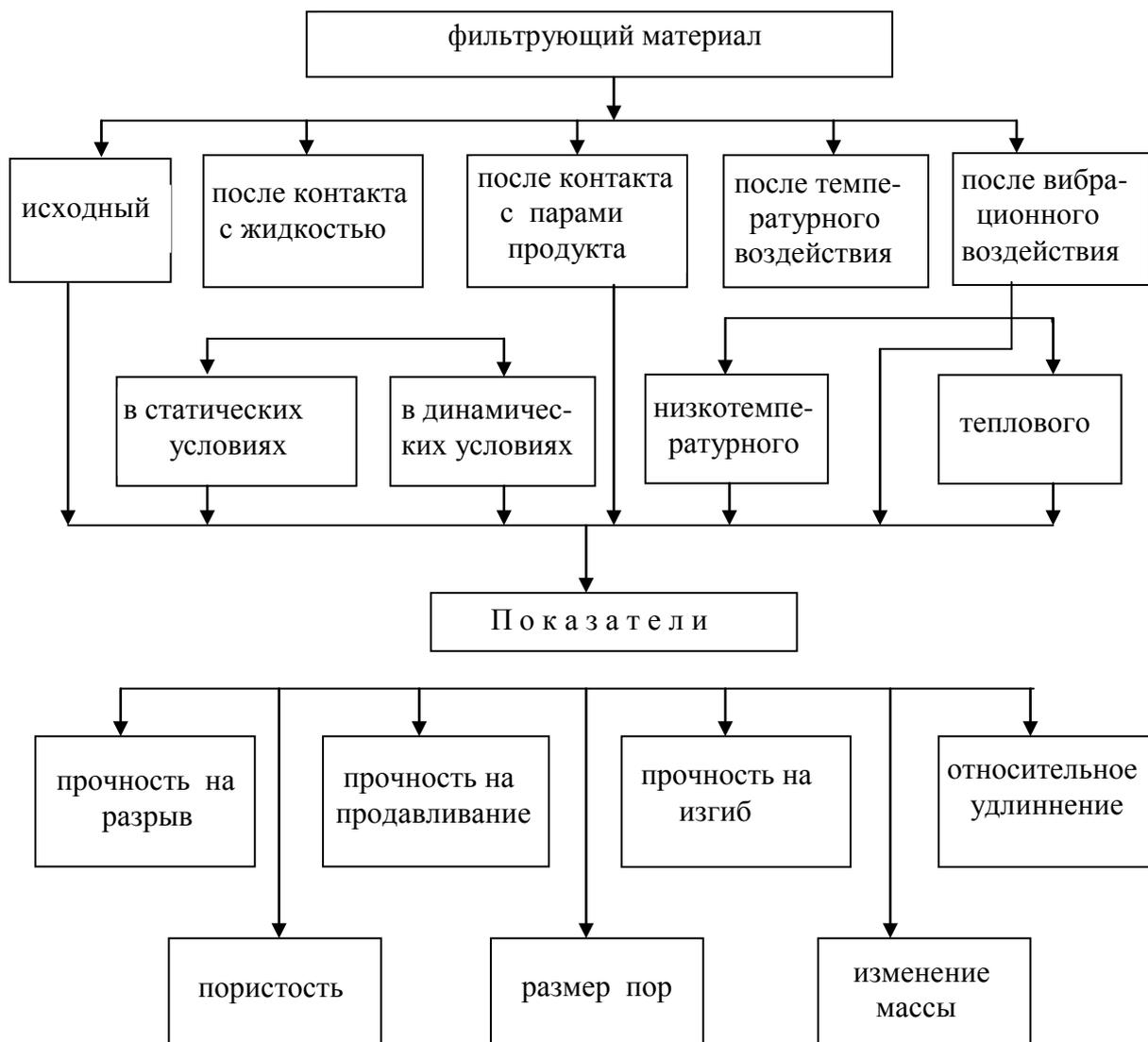


Рис.17.4. Структурная схема определения физико-механических свойств фильтрующих материалов

При проведении этих испытаний учитываются условия работы данного материала и те воздействия, которые он испытывает при эксплуатации.

Площадь фильтрующей перегородки определяется из условия неразрывности потока жидкости

$$s = Q_{\Phi} / V, \quad (17.10)$$

где Q_{Φ} – заданная пропускная способность фильтра, м³/с;

V – скорость фильтрования, м/с.

Площадь фильтрующей перегородки проверяют с тем, чтобы установить соответствует ли грязеемкость фильтра заданному ресурсу работы. Если это условие при найденной площади не соблюдается, то эту площадь соответственно увеличивают.

Гидравлическое сопротивление узлов, имеющих внутреннюю полость цилиндрической формы и круглое проходное сечение, определяют по формуле Дарси:

$$h_{\text{сопр}} = \lambda \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g}, \quad (17.11)$$

где $h_{\text{сопр}}$ – гидравлическое сопротивление, м;

λ – коэффициент гидравлического сопротивления;

L и d – соответственно длина и диаметр цилиндрического участка, м.

При ламинарном движении жидкости $\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$,

где Re – критерий Рейнольдса, $\text{Re} < 2000$.

17.1. Фильтрация рабочей жидкости при низких температурах

Транспортные машины, работая в горных условиях при низких температурах нарушают работу систем питания и смазки из-за наличия избыточной и эмульсионной воды в топливе или масле. Это приводит к быстрым отказам в двигателях, а также повышенным износам в соответствующих парах трения. Для анализа качества фильтрации жидкости авторы воспользовались результатами экспериментальных исследований Н.В.Капралова и Ж.С.Черненко полученными в Киевском институте инженеров гражданской авиации.

Общее содержание воды в топливе транспортных машин достигает 0,015-0,02%. Избыточная и эмульсионная вода при отрицательных температурах топлива ниже $-5 - 10^{\circ}\text{C}$ образует кристаллы льда, которые задерживаются на поверхности топливных фильтров и вызывают повышение перепада давления до открытия предохранительного клапана.

Топливные фильтры с тонкостью фильтрации менее 50 мкм, расположенные за пределами силовой установки, забиваются кристаллами льда при содержании воды в топливе более 0,002% и отсутствии присадки. Так фильтр с сеткой саржевого плетения начинает забиваться кристаллами льда при расходе охлажденного в баке топлива, содержащего 0,002% воды, когда его температура достигает $24 - 28^{\circ}\text{C}$. Увеличение содержания воды до 0,01% повышает температуру начала забивания этого фильтра до $-4^{\circ} - -5^{\circ}\text{C}$ (рис.17.5.)

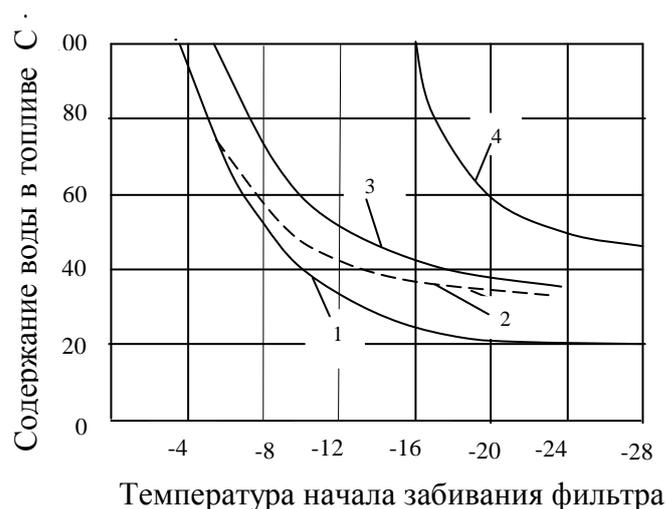


Рис. 17.5. Влияние содержания воды на температуру забивания фильтров кристаллами льда: 1 - из бака через фильтр с сеткой саржевого плетения; 2 - из мягкого бака через фильтр с сеткой саржевого плетения; 3 - из мягкого бака через фильтр с плющенной сеткой; 4 - из мягкого бака и бака через фильтры с сеткой саржевого плетения и сплющенной сеткой при наличии 0,1% антиобледенительной присадки

Фильтр с плющенной сеткой начинает забиваться кристаллами льда при расходе того же топлива из мягкого бака с более низкой температурой. Пунктирной линией показана температура начала забивания фильтра с сеткой саржевого плетения при расходе охлажденного в мягком баке топлива. Топливо находится как в мягком баке, так и в баках-кессонах, в дальнейшем описании будем обозначать их баками.

Наличие в топливе 0,1% антиобледенительной присадки снижает температуру начала забивания фильтров с плющенной сеткой и сеткой саржевого плетения до -16° – -30° С при охлаждении топлива, содержащего 0,004 — 0,01% воды, в мягких баках и баках.

Забивания фильтров с плющенной сеткой и сеткой саржевого плетения при наличии в топливе 0,2% антиобледенительной присадки и охлаждения топлива в баках и мягких баках не наблюдается до температуры -40° С. В топливе, содержащем 0,3% антиобледенительной присадки, образование кристаллов льда не происходит до температуры -60° С.

Подача на фильтр с сеткой саржевого плетения охлажденного в баке топлива, содержащего растворенную воду более 0,002%, без антиобледенительной присадки приводит к повышению на нем перепада давления за счет скопления кристаллов льда на поверхности и в каналах фильтроэлементов. С увеличением содержания воды в топливе уменьшается время забивания фильтра кристаллами льда до открытия предохранительного клапана. Фильтры с плющенной сеткой при расходе охлажденного в мягких баках топлива забиваются кристаллами льда медленнее (рис. 17.6.)

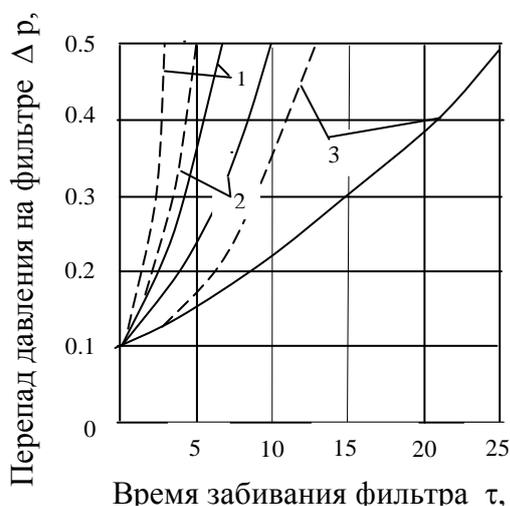


Рис. 17.6. Изменение перепада давления на фильтре с плющенной сеткой (пунктирные кривые) и на фильтре с сеткой саржевого плетения (сплошные

кривые) при забивании кристаллами льда в зависимости от времени фильтрования охлажденного топлива без антиобледенительной присадки: 1 – содержание воды в исходном топливе 0.0214%; 2 – 0.0177%; 3 – 0.0100%.

На рис.17.5 и 17.6 показан рост перепада давления на фильтре с сеткой саржевого плетения при расходе охлажденного в баке топлива, содержащего в исходном состоянии эмульсионную воду и 0,1% антиобледенительной присадки. Время забивания фильтров кристаллами льда до открытия предохранительного клапана зависит также от скорости охлаждения топлива. Фильтр саржевого плетения забивается кристаллами льда быстрее (рис.17.7. и 17.8.) при охлаждении топлива в баке по сравнению с охлаждением в мягком баке.

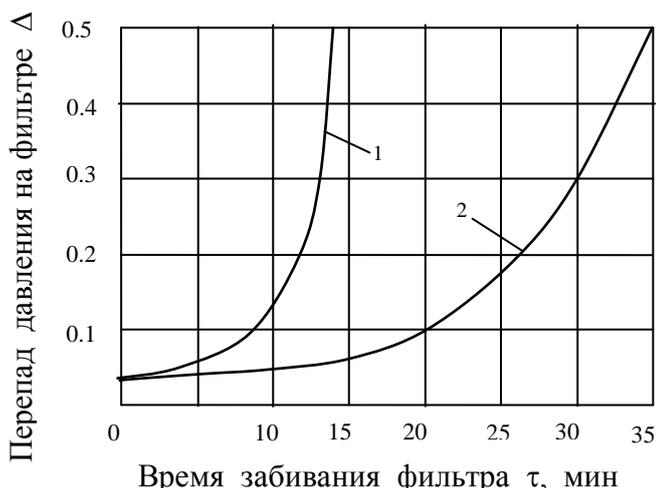


Рис. 17.7 Изменение перепада давления на фильтре с сеткой саржевого плетения при забивании кристаллами льда в зависимости от времени фильтрования охлажденного топлива с 0.1% антиобледенительной присадки: 1 – содержание воды в исходном топливе 0.013%; 2 – 0.0080%.

Время забивания фильтра кристаллами льда до перепада давления $0.5 \cdot 10^5$ Па для различных содержаний воды в топливе без антиобледенительной присадки в значительной степени зависит от скорости и тонкости фильтрации и может быть выражено эмпирическим уравнением вида:

$$C = \frac{A_{\omega, \Phi}}{\tau^{0.6}}, \quad (17.12)$$

где C — содержание воды в топливе, %; τ — время, мин; $A_{\omega, \Phi}$ — коэффициент фильтрации кристаллов льда, % · мин.

Коэффициент $A_{\omega, \Phi}$ в зависимости от скорости фильтрации имеет вид A_{ω} , а от тонкости фильтрации — A_{Φ} и выражается эмпирическими уравнениями вида:

$$A_{\omega} = \frac{1 + \alpha_T \omega}{\beta_T \omega} \quad \text{и} \quad A_{\Phi} = 0.03 \Phi^{0.4}, \quad (17.13.)$$

где ω — скорость фильтрации, м/с; Φ — тонкость фильтрации, мкм;

α_T — параметр уравнения, %-мин; β_T — безразмерный параметр. Значения параметров α_T и β_T приведены в таблице 17.2

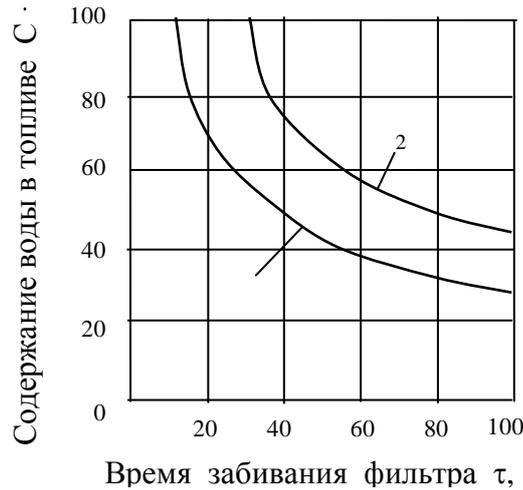


Рис. 17.8. Влияние содержания воды на время забивания фильтра с сеткой саржевого плетения кристаллами льда до открытия предохранительного клапана ($\Delta P = 0.5 \times 10^5$ Па) при охлаждении топлива в баке (1) и в мягком баке (2)

Таблица 17.2

Значения параметров α_T и β_T

Вид фильтра	Параметры	
	α_T	$\beta_T, 10^3$
С плющевой сеткой	215	11.5
С сеткой саржевого плетения	55	3.85

Изменение перепада давления, на фильтрах от начального до $0,5 \cdot 10^5$ Па в зависимости от времени забивания фильтров кристаллами льда при расходе охлажденного топлива без антиобледенительной присадки может быть выражено эмпирическим уравнением вида:

$$\Delta P = \Delta P_0 \times V_{\omega, \phi}^{\alpha_T}, \quad (17.14)$$

где P — перепад давления на фильтре в момент открытия предохранительного клапана, Па; ΔP_0 — то же в начальный момент, Па; ϕ - параметр размерности, 1/мин; $V_{\omega, \phi}$ — безразмерный коэффициент.

Коэффициент $V_{\omega, \phi}$ в зависимости от скорости фильтрации имеет вид V_{ω} , а от тонкости фильтрации - V_{ϕ} и выражается эмпирическими уравнениями вида:

$$V_{\omega} = \frac{\alpha_{\omega}}{1.03 - K_{\omega} C} \quad \text{и} \quad V_{\phi} = \frac{\alpha_{\phi}}{1.03 - \frac{20C}{\phi^{0.4}}}, \quad (17.15)$$

где α_{ω} и α_{ϕ} — параметры размерности, 1 · %; K_{ω} — безразмерный параметр уравнения.

Параметр K_{ω} можно определить по эмпирическим зависимостям вида: для фильтра с сеткой саржевого плетения;

$$K_{\omega} = \frac{10 \cdot 10^3 \omega}{1 + 0.3 \cdot 10^3 \omega} \quad (17.16)$$

для фильтра с плющеной сеткой

$$K_{\omega} = \frac{3 \cdot 10^3 \omega}{1 + 40 \omega} \quad (17.17)$$

Анализ забивания фильтров кристаллами льда с одновременным изменением расхода топлива показывает, что до перепада давления $0,12 - 0,15 \cdot 10^5$ Па фильтрация топлива происходит с постоянной скоростью, а от $0,12 - 0,15$ до $0,5 \cdot 10^5$ Па — с переменной. В обоих случаях фильтрация выражается следующим уравнением:

$$\frac{dV}{S d\tau} = \frac{\Delta P}{\mu (R_{с.л} + R_{ф.э})} \quad (17.18)$$

где V — объем топлива, прошедшего через фильтр, m^3 ; S — фильтрующая поверхность фильтра, m^2 ; μ — коэффициент кинематической вязкости, $Pa \cdot C$; $R_{с.л}$ — сопротивление льда, m^{-1} ; $R_{ф.э}$ — сопротивление фильтроэлемента, m^{-1} .

С учетом полученного уравнения изменения перепада давления на фильтре при забивании кристаллами льда $R_{с.л}$ и $R_{ф.э}$ можно выразить в виде уравнений:

$$R_{ф.э} = \frac{\Delta P_0}{\mu \omega} \quad \text{и} \quad R_{с.л} = \frac{\Delta P_0}{\mu \omega} (B_{\omega, \phi}^{\varphi, \tau} - 1) \quad (17.19)$$

Тогда уравнение (17.18) примет вид:

$$\frac{dV}{S d\tau} = \frac{\Delta P}{\Delta P_0 B_{\omega, \phi}^{\varphi, \tau}} \quad (17.20)$$

В процессе фильтрации охлажденного топлива на поверхности фильтра задерживаются кристаллы льда, образующиеся в потоке топлива. Наблюдениями за состоянием поверхностей сетчатых фильтроэлементов и саржевого плетения установлено, что механизм забивания фильтров кристаллами льда есть процесс закупоривания каналов, а не обледенение вследствие замерзания переохлажденной воды на поверхности фильтроэлемента. Кристаллы льда задерживаются на поверхности фильтроэлемента из нормальной или плющеной сетки, постепенно образуя на поверхности отложения льда возрастающей толщины. На фильтроэлементе из сетки саржевого плетения кристаллы льда задерживаются в извилистых каналах фильтроэлемента, а также образуют на его поверхности отложения льда.

Забивание фильтроэлемента кристаллами льда с постепенной закупоркой каналов на фильтрах с сеткой саржевого плетения происходит в том случае, если содержание растворенной воды в топливе более $0,002\%$. При охлаждении такого топлива до температуры ниже $-15 \div -10^0 C$ в потоке топлива образуются кристаллы льда путем сублимационного роста их на центрах кристаллизации. Кристаллы имеют иглообразную форму диаметром $2 - 5$ мкм и длиной до 50 мкм. Количество таких кристаллов

невелико, а их размеры соизмеримы с размерами каналов фильтроэлемента. Кристаллы обладают очень малой прочностью и, попадая в каналы фильтроэлемента, разрушаются под воздействием потока топлива или перепада давления. Разрушенные кристаллы могут проникать внутрь каналов фильтроэлемента.

Изменение сопротивления фильтрации в этом случае определяется уравнением вида:

$$\frac{dR}{dq_{\tau}} = k'R^{3/2}, \quad (17.21)$$

где R — общее сопротивление фильтроэлемента и слоя льда, m^{-1} ; q_{τ} — удельный расход топлива, m .

Коэффициент k' выражается уравнением вида:

$$k' = \frac{2 \left(\sqrt{\frac{\omega_{нач} \Delta P}{\Delta P_0}} - \sqrt{\omega} \right)}{q_{\tau}}, \quad (17.22)$$

где $\omega_{нач}$ — начальная скорость фильтрации, m/c .

С увеличением содержания растворенной воды в топливе до $0,008 \div 0,01$ % количество иглообразных кристаллов растет. В потоке топлива эти кристаллы могут группироваться, образуя скопления льда в виде хлопьев различных размеров, достигающих 50 μm . Таким образом, наряду с иглообразными кристаллами, которыми забиваются каналы фильтроэлемента саржевого плетения, в потоке топлива существуют скопления кристаллов льда в виде хлопьев. Размеры хлопьев льда больше размеров каналов фильтроэлемента, поэтому они осаждаются на поверхности. Кроме того, скопления льда в виде хлопьев могут разрушаться, способствуя дальнейшему забиванию каналов.

Изменение сопротивления фильтрации при забивании фильтра саржевого плетения, когда кристаллы льда проникают в каналы и задерживаются на поверхности фильтроэлемента, можно определить уравнением вида

$$\frac{dR}{dq_{\tau}} = k''R \quad (17.23)$$

Коэффициент k'' определяется уравнением вида

$$k'' = \frac{\ln \omega_{нач} - \ln \omega}{q_{\tau}} \quad (17.24)$$

На поверхности фильтра с нормальной или плющеной сеткой образуются скопления кристаллов льда возрастающей толщины при содержании в топливе как растворенной (более $0,004\%$), так и эмульсионной воды. Присутствующие в топливе капли эмульсионной воды при фильтрации топлива конденсируются на поверхности фильтроэлемента и прилипают к нему. С понижением температуры ниже $-5 \div -10^{\circ}C$ капли эмульсионной воды в потоке топлива превращаются в кристаллы льда путем кристаллизации переохлажденных капель. Такие

кристаллы имеют шарообразную форму и достигают размеров 20—25 мкм. Количество их зависит от содержания эмульсионной воды в топливе.

Прилипшие к поверхности фильтроэлемента капли воды замерзают, способствуя дальнейшему интенсивному его забиванию. Дальнейшее повышение перепада давления продолжается за счет накапливания на поверхности образовавшихся в потоке топлива кристаллов льда, количество которых на фильтроэлементе со временем увеличивается до слияния в сплошную рыхлую корку, имеющую матовую поверхность.

Изменение сопротивления фильтрации при забивании фильтра с нормальной или плющенной сеткой кристаллами льда можно определить с помощью уравнения

$$\frac{dR}{dq_{\tau}} = k''' \quad (17.25)$$

Коэффициент k''' определяется следующим уравнением:

$$k''' = \frac{1}{q_{\tau}} - \frac{1}{\omega_{\text{нач}}} \quad (17.26)$$

Отложившийся на фильтроэлементе лед имеет рыхлую структуру и легко отслаивается от его поверхности.

Таким образом, содержащаяся в топливе вода при отрицательных температурах приводит к образованию кристаллов льда, которые, оседая на фильтроэлементах, забивают топливные фильтры. Время забивания фильтров до открытия предохранительных клапанов зависит, в основном, от конструкции бака, скорости и тонкости фильтрации. Повышение перепада давления на фильтрах при забивании их кристаллами льда происходит за счет образования отложений льда возрастающей толщины на плоских сетчатых фильтроэлементах, а также постепенной закупорки каналов и скопления кристаллов льда на поверхности фильтроэлементов саржевого плетения.

17.2. Установки для очистки масел на основе мембран

Разработано значительное количество конструкций фильтрующих элементов и аппаратов на их основе, использующих явления обратного осмоса и ультрафильтрации.

Фильтрующие мембранные элементы используются в основном в виде плоских пленок, трубок и полых волокон. Однако для разделения жидких смесей, предварительная очистка которых от различных твердых и гелеобразных включений невозможна и экономически не целесообразна. Наиболее эффективны аппараты с трубчатыми фильтрующими элементами (ТФЭ), характеризующиеся простотой изготовления, монтажа и обслуживания.

Полупроницаемая мембрана представляет собой пористую полимерную пленку анизотропной структуры, состоящую из тонкого ($\delta=0,25$ мкм)

поверхностного слоя, являющегося селективным барьером и микропористого подслоя (100-200 мкм).

Дренажный корпус, как правило, состоит из опоры, обеспечивающей необходимую прочность и отвод фильтрата, и мелкопористой подложки, исключаяющей вдавливание мембраны в дренажные каналы опоры под воздействием рабочего давления смеси.

Конструктивно ТФЭ могут быть трех типов: с полупроницаемой мембраной на внутренней или наружной поверхности каркаса и с комбинированным ее расположением.

Для ТФЭ с мембраной на внутренней поверхности каркаса характерны: малая материалоемкость из-за отсутствия напорного корпуса; незначительное гидравлическое сопротивление потоку фильтрата в связи с небольшой длиной дренажного канала. Мембрана имеет хорошие гидродинамические условия работы за счет равномерности потока раствора во всех точках ее поверхности; возможности механической очистки элементов от осадка; защищенности мембраны от ее повреждения во время установки ТФЭ в аппаратах.

Недостатками такой конструкции являются небольшая удельная поверхность мембран (отношение рабочей поверхности мембраны к единице объема ТФЭ), повышенные требования к прочности изготовления внутреннего диаметра каркаса.

Конструкции ТФЭ с мембраной, расположенной на наружной поверхности каркаса, имеют более высокую рабочую удельную поверхность мембран, так как обеспечивают получение ТФЭ малых диаметров.

При небольшом рабочем давлении (например, при ультрафильтрации) трубчатую мембрану предложено использовать без каркаса или армировать ее в процессе формования тканым рукавом. Диаметр таких мембран обычно не превышает 3-5 мм. Это значительно превышает удельную рабочую поверхность мембран, снижает материалоемкость аппаратов, вследствие чего они по техническим характеристикам приближаются к аппаратам и элементам в виде полого волокна.

Представляют интерес - проведение исследований по очистке отработанных моторных масел на основе мембранных процессов с помощью углеграфитовых ТФЭ, (наружный диаметр 8-12 мм, толщина стенки 2 мм) используемых в электротехнической промышленности в качестве оболочек.

Результаты работы показали, что мембраны на основе графитовых ТФЭ имеют высокую степень очистки отработанного индустриального масла (селективность по зольным компонентам 75-95%, по содержанию механических примесей 85-100%, по асфальтенам 30-40%).

Однако при конструировании аппаратов для УФ и ОО одной из сложных технологических задач является крепление и уплотнение ТФЭ, обусловленное высокими рабочими давлениями при проведении этих процессов (до 100 кг/см²), а также сложность выявления и устранения возможного дефекта мембран в таких модулях.

Важным фактором для надежной работы аппаратов ТФЭ является создание однородного гидродинамического режима во всех точках поверхности трубчатых мембран.

Это достигается:

- установкой коллекторов, обеспечивающих параллельное, последовательное или параллельно-последовательное соединение ТФЭ;
- равномерным сужением напорных каналов по длине ТФЭ,
- установкой перегородок, регулирующих количество параллельно работающих ТФЭ.

Для компенсации потери напора предложено внутри аппаратов или на технологической линии устанавливать центробежные насосы. Концентрационная поляризация значительно ухудшает условия работы мембраны: повышает осмотическое давление раствора, что требует увеличение давления в напорном канале, ухудшает качество фильтрата, может вызвать образование осадка на поверхности, мембран, сокращает срок службы ТФЭ.

По простоте и рациональности конструкции, технологичности изготовления, удобству монтажа и обслуживания заслуживают внимание трубчатые мембраны.

Рассмотрим передвижную установку для очистки отработанных масел ПУОМ-100, предназначенную для периодической очистки и регенерации отработанных автотракторных масел.

Техническая характеристика.

1. Производительность, л/час	- 100
2. Объемы емкостей, л.	- 50
3. Мощность установки, кВт	-4,1
4. Мощность нагревателя, кВт	-3
5. Мощность электродвигателя, кВт	-1,1
б. Насос шестеренчатый	-НШ-10У
7. Рабочее давление, мПа	-0,2
8. Температура нагрева, С	-80
9. Тонкость очистки, мкм	-2...3
10. Показатели масла, очищенного в % не более:	
массовое содержание механических примесей	- 0,0015
массовое содержание воды - следы	содержание топлива - 0,8
11. Габаритные размеры, мм:	
высота	-960
длина	-1100
ширина	-680
12. Масса, кг	-240

Схема передвижной установке для очистки отработанного масла ПУОМ-100 показана на рис. 17.9.

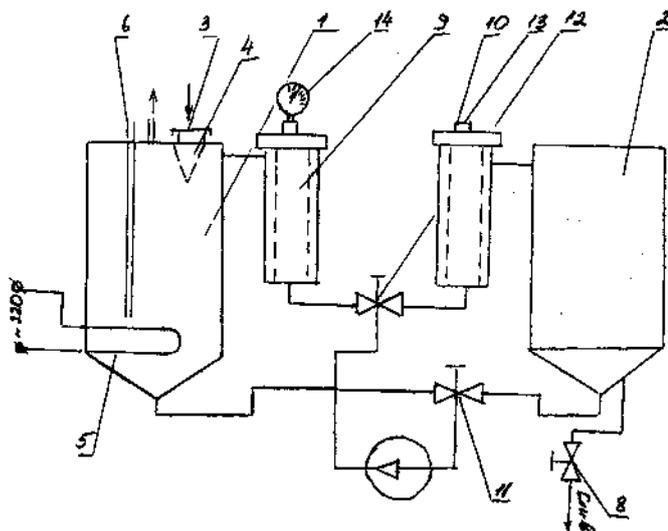


Рис.17.9. Передвижная установка для очистки отработанного масла
ПУОМ-100

1-Бак для отработанного масла; 2-Бак для очищенного масла; 3-Крышка - горловины заливки отработанного масла; 4-Фильтр грубой очистки отработанного масла; 5-ТЭН-нагреватель; 6-Термометр; 7-Насос НШ - 10У; 8-Кран 3 позиционный; 9-Фильтр средней очистки отработанного масла; 10-Фильтр мелкой очистки отработанного масла; 11-Кран 3-х позиционный всасывания; 12-Кран 3-х позиционный выхода; 13-Манометр.

Технология регенерации отработанных масел включает:

- удаление механических примесей;
- обезвоживание;
- отгонка топливных фракций;
- удаление продуктов окисления и частичное осветление;
- восстановление присадок.

Установка изготовлена на основе полупроницаемых мембран, преимущества, которых заключается в более высокой и постоянной производительности и повышенном ресурсе работы.

Применение мембранного метода ультра и микрофльтрации для очистки и регенерации отработанных масел позволило получить продукт, практически не содержащий примесей близкий по качеству свежим маслам.

17.3. Анализ устройств для очистки жидкости, используемых на колесных машинах

Удаление механических примесей не исчерпывает всех процессов в гидравлических системах, однако является одной из главных составляющих в общем комплексе очистки. Во многих случаях удаление из жидкости твердых дисперсных примесей с размерами, превышающими определенную величину, полностью решает проблемы очистки. Для всех отраслей промышленности отказы гидросистем из-за износа, вследствие завышенной

загрязненности рабочих жидкостей составляют 50 – 80% всех отказов, а ресурс агрегатов гидропривода по этой причине снижается в 3 ... 50 раз.

Таблица 17.3.

Хроматографический анализ растворенных в масле газов, % об.

Газ	До обработки	После обработки
Водород, H ₂	<0,0001	<0,0001
Углекислый газ, CO ₂	0,0714	0,0468
Окись углерода, CO	0,0028	0,0006
Метан, CH ₄	0,0006	<0,0001
Этилен, C ₂ H ₄	0,00096	0,0001
Ацетилен, C ₂ H ₂	0,0024	0,0013
Этан, C ₂ H ₆	0,0010	0,0001

В таблице 17.3 дан хроматографический анализ растворенных в масле газов. Уменьшение содержания газов в масле может быть объяснено их лучшей растворимостью в воде, чем в углеводородах. При фильтрации масла через влажный фильтр происходит не только отмывка масла от кислых продуктов, но и частичное его обезгаживание.

В таблицах 17.4 и 17.5 показаны результаты очистки гидравлических масел на лабораторной установке «АПРИС».

Таблица 17.4.

Класс чистоты масла М10Г2к после очистки на установке «АПРИС»

Размер частиц	Количество частиц	Класс чистоты
5-10	22870	11
10-25	3974	9
25-50	653	10
50-100	195	11
100-200	39	11
>200	18	12

Таблица 17.5.

Результаты очистки масел на установке «АПРИС»

Масло	Гидравлическое АМГ 10		Гидравлическое М10Г2к	
	Содержание воды, %	Содержание механических примесей, %	Содержание воды, %	Содерж. механ. примесей, %.
Исходное (до очистки)	0,105	0,15	0,03	0,19
После очистки	0,002	0,05	0,002	0,08

Приведенные результаты подтверждают высокую эффективность установки при очистке работавших масел от воды и механических примесей.

На первом этапе масло прокачивалось через подогреватель сепаратора, где нагревалось до 45С, очищалось центробежный сепаратором

производительностью 4 м³/час, после чего фильтровалось через установку «АПРИС». Количество загрязнений в масле при различных увеличениях отобранной пробы приведены в табл.17.6.

Таблица 17.6.

№ отобранной пробы	Количество загрязнений в масле при увеличении		Класс чистоты	
	20х	10х	ISO 4406	ГОСТ 17216
1/1	67800	16050	17/15	12/13
1/2	29000	16380	15/15	10/13
2/1	378600	178620	19/18	14/15
2/2	91800	26910	17/15	12/13
3/0	81000	33930	17/15	12/13

Анализ показывает, что одним из ключевых направлений решения остроты рассматриваемой проблемы является использование относительно недорогих устройств очистки с малой стоимостью эксплуатации для удаления примесей с тонкостью фильтрации 10 ... 25 мкм при высоком уровне исходной загрязненности. Выбор этого диапазона с одной стороны обусловлен тем, что в большинстве систем циркуляции технологических жидкостей такой тонкости достаточно для надежной работы насосов, распределителей, силовых цилиндров, арматуры и проточных каналов. С другой стороны, там, где требуется более высокая тонкость фильтрации, чаще всего необходима предварительная очистка.

Основная сложность реализации относительно недорогой очистки жидкостей от частиц крупнее 10 ... 25 мкм заключается в том, что ни один из известных подходов не является достаточно унифицированным.

Основными способами очистки от механических примесей являются очистка в силовых полях и фильтрование. В табл. 17.7. для наиболее распространенных устройств очистки жидкости, способных обеспечить удаление механических примесей с тонкостью фильтрации 10 ... 25 мкм приведены характерные значения ряда технических характеристик, определяющих возможные условия применения, удельные габариты, трудоемкость и себестоимость изготовления и эксплуатации этих устройств.

Сравнительный анализ показывает, что наибольшее число рассматриваемых характеристик одновременно имеют близкие к наилучшим значения для гидродинамических фильтров.

В гидродинамических фильтрах частицы примесей у поверхности фильтрующей перегородки имеют касательную составляющую относительной скорости. Гидродинамический эффект проявляется в самоочистке фильтрующей перегородки и в повышении тонкости по сравнению с размерами отверстий в фильтрующей перегородке.

В неполнопоточных гидродинамических фильтрах движение частиц вдоль перегородки обеспечивается постоянным сбросом части жидкости, уносящей примеси, на слив, минуя линию фильтрата

Таблица 17.7.

Анализ устройств для очистки жидкости

Технические характеристики	Устройства очистки жидкостей от механических примесей							
	Динамические отстойники	Противоточные гидrocиклоны	Центрифуги	Фильтры объем-ной загрузки	Сетчатые фильтры	Сетчатые фильтры противоточной промывочной	Неполнопогодные Гидродинамиче	Ротационные фильтры
Возможность очистки вязких жидкостей								
Чувствительность к плотности частиц	+	+	+					
Расходная скорость рабочей плоскости, м/с,	0.00 015		0 .01	0. 003	0. 01	0.05	0.0 5	
Возможность работы в напорных линиях	+	-	+	+				
Удельная мощность привода, кВт/(м ³ /с)			2					
Саморегенерация				-	-			
Потери давления, мПа		0.2						0. 3
Допустимый уровень загрязненности, Г/л				0. 5	0. 1	1		
Сложность конструкции изготовления			+			+		
Потери жидкости на саморегуляцию, %						3	10	



Наилучшие или близкие к ним значения соответствующих характеристик

Наиболее перспективным, по нашему мнению, направлением развития в области производства фильтров очистки масла должен остаться классический

подход применения сменных фильтроэлементов, но с использованием 100% синтетических фильтрующих материалов.

Так, например, оригинальность конструкции масляных фильтроэлементов производства ЯМЗ заключается в использовании в качестве фильтровального материала иглопробивного полиэфирного нетканого полотна и отказе от применения при их сборке клеев-пластизолей, существенно влияющих на качество и надежность фильтроэлементов.

В отличие от бумажных фильтров, где в основном действует поверхностный механизм фильтрации, в фильтроэлементах из нетканого полотна при толщине материала 2,7 мм преобладает объемный механизм фильтрации. Это позволило увеличить ресурс работы до засорения элемента в 2—2,5 раза (по сравнению с традиционными) с сохранением при этом высокого качества очистки масла. Срок смены фильтроэлемента увеличен до 1000 часов работы двигателя (по результатам эксплуатационных испытаний двигателей ЯМЗ-7511.10 на автомобилях МАЗ). При этом номинальная тонкость отсева (95%) на уровне 35 мкм, что выше, чем в традиционных фильтроэлементах, выполненных с применением импортной бумаги (45 мкм).

Таблица 17.8.

Рекомендации по применению гидравлических масел, специально созданных для объемных гидроприводов

Гидравлические масла	Насосы применяемые в гидросистемах:						Аналоги зарубежных рабочих жидкостей
	Аксиально-поршневые		Пластичные		Шестеренные		
	Температурные пределы применения масла, °С						
	Кратковременно	Длительно	Кратковременно	Длительно	Кратковременно	Длительно	
М 10 Г 2к	от -53 ⁰ до +75 ⁰	от -40 ⁰ до +60 ⁰	от -53 ⁰ до +35 ⁰	от -35 ⁰ до +50 ⁰	от -58 ⁰ до +55 ⁰	от -43 ⁰ до +35 ⁰	Shell Tellus Vobil Fluid 93 Esso Univitij 43 BR Energol HL P20
МГЕ - 46В (МГ- 30)	от -15 ⁰ до +75 ⁰	от -5 ⁰ до +70 ⁰	от -15 ⁰ до +80 ⁰	от -0 ⁰ до +75 ⁰	от -20 ⁰ до +70 ⁰	от -10 ⁰ до +60 ⁰	Agip OSO Tellus Oel 46 Energol HL P46 EP Hydraulic Oel 46

За последние 10 лет иностранные производители двигателей стали применять неразборные фильтры очистки масла («spin-on»). Применение неразборных фильтров вместо фильтроэлементов не несет в себе технической новизны и не улучшает качество очистки масла. Хотя в данном случае есть определенные упрощения:

- для заводов-производителей двигателей — снижение трудозатрат;
- несложная замена использованных фильтров;

– практически полное отсутствие риска внесения загрязнений в систему маслоснабжения двигателя при замене фильтра.

В настоящее время все больше внимания уделяется экологическим параметрам фильтров, иными словами, легкости утилизации. Надо сказать, что фильтр по сравнению с фильтроэлементом утилизировать значительно сложнее.

В заключение можно дать следующие рекомендации по применению на тракторах гидравлических масел М10 2к и МГЕ-46В (таблицы 17.8 и 17.9).

Таблица 17.9

Параметры масла М 10 2К

Показатели масла	Время работы масла, ч						Браковочные значения
	200	2000	3000	5000	6000	7500	
Вязкость кинематическая при 100 ⁰ С, сСт	10.4	10.2	10.4	10.4	10.1	10.2	9 – 9.5
Кислотное число, $\frac{\text{мГ кон}}{\text{Г масла}}$	1.36	2.14	2.88	2.85	3.05	3.8	4.0
Щелочное число $\frac{\text{мГ кон}}{\text{Г масла}}$	7.73	5.19	5.16	5.3	6.1	4.8	4.6
Содержание механических примесей нерастворенных в бензине, %	0.24	0.36	0.44	0.61	0.69	1.45	2.5
Температура вспышки, ⁰ С	215	210	209	208	210	201	170

Вопросы по теме:

1. Как производится очистка рабочих жидкостей от механических загрязнений.
2. Дать схему определения физико-механических свойств фильтрующих материалов.
3. Привести характеристику грязеемкости фильтра.
4. Особенности фильтрации рабочей жидкости при низких температурах
5. Как лед влияет на качество фильтрации?
6. Что происходит когда фильтры забиваются кристаллами льда.
7. Какой тип фильтроэлементов применяется в гидросистемах транспортных машин?
8. Характеристики устройств для очистки жидкости?

Вопросы по самостоятельной работе

2. Изучить типы фильтрующих элементов гидросистем транспортных машин и дать их схемы.

Литература

1. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машины. Справочник. М., Машиностроение, 1983, с. 320
2. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Под общей ред. А.В. Чичинадзе – М.. Машиностроение, 2001
3. Лебедев О.В., Абзалов П.М. Повышение работоспособности тракторных гидроприводов. Т., Фан, 1991, 120 с.
4. Лебедев О.В., Шарипов К.А., Мажидов А.Х., Искандаров У.Т. Повышение эффективности использования смазочных масел. Т., изд. «ФАН», 2004, с.128
5. Рыбаков К.В.,Коваленко В.П., Фильтрация авиационных масел и специальных жидкостей. М.. Транспорт, 1977. 328 с.
6. Коваленко В.П. Загрязнения и очистка нефтяных масел. М. Химия, 1978г.304 с.
7. Коновалов В.М., Скрицкий В.Я., Рокшевский В.А. Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков. М.,Машиностроение, 1976, 288 с.
8. Коваленко В.П., Ильинский А.А. Основы техники очистки жидкостей механических загрязнений. – М.: Химия, 1982 –272с.

18. Моделирование процессов изнашивания по параметрам работающего масла

Процесс трения и износа в ДВС транспортных машин – это сложный процесс механического и физико-химического взаимодействия пар трения и среды, основным положением которого является взаимосвязь между трением, износом и смазкой.

Прогнозировать работу двигателя и изнашивание можно по параметрам работающего масла.

Характеристику состояния деталей двигателя можно описать по семи основным элементам индикаторам (табл. 18.1).

Таблица 18.1

Техническое состояние двигателя, характеризуемое индикатором

№№ п/п	элемент- индикатор	изменение технического состояния двигателя, характеризуемая появлением элемента-индикатора в масле
1.	Железо	изнашивание шеек коленчатого вала, гильз (втулок) цилиндров, подшипников качения, зубьев шестерен
2.	Кремний	попадание пыли из воздуха
3.	Алюминий	изнашивание поршня, подшипников
4.	Медь, свинец	изнашивание и выкрашивание подшипников, поршневых колец
5.	Олово, хром	Изнашивание поршневых колец
6.	Никель	изнашивание клапанов, подшипников качения
7.	Магний	Попадание воды в масло из системы охлаждения

Содержание металла износа в масле определяется эмиссионным спектрографом.

Математическая модель процесс изнашивания может быть представлена уравнением регрессии, в котором зависимой переменной является химический элемент – индикатор износа, характерный для определения групп деталей или узлов двигателя.

Число независимых переменных, которые оказывают влияние на процесс, устанавливается путем анализа функциональной и параметрической моделей ДВС-масло.

Моделирование обычно выполняется на основе математического планирования эксперимента.

За количественные факторы принимают физико-химические и спектральные показатели работающего масла, а за качественные - наработку двигателей и сорт применяемого масла.

Износ цилиндрических втулок и колец сопровождается поступлением в работающее масло Fe и ряда легирующих элементов. Поскольку основное количество Fe (около 35%) поступает от износа этих деталей, то в качестве зависимой переменной применяется концентрация его в работающем масле.

В качестве вспомогательных элементов-индикаторов принимается концентрация их в работающем масле. В качестве вспомогательных элементов-индикаторов принимаются легирующие элементы, по содержанию которых распознается основной источник поступления Fe. Основными переменными факторами, оказывающими существенное влияние на износ цилиндрических втулок и колец, служат абразивная среда, выраженная содержанием Si в работающем масле и коррозионная среда, наилучшим образом характеризуемая щелочным числом (ЩЧ).

При использовании линейной двухфакторной модели все коэффициенты регрессии получаются значительными, поэтому наиболее подходящей математической моделью является: $Fe = a_0 + a_1 Si + a_2 \text{ЩЧ}$.

Для транспортных колесных машин с мощностью двигателя до 200 кВт можно использовать следующую модель:

$$Fe = 16.032 + 1.517Si - 3.827\text{ЩЧ},$$

$$R = 0.757$$

где Fe, Si - концентрация Fe и Si в работающем масле, $10^{-3}\%$;

ЩЧ - щелочное число работающего масла $\frac{\text{мг КОН}}{\text{г масла}}$;

R - множественный коэффициент корреляции

Анализ уравнения регрессии показывает, что малоизношенные цилиндрические втулки имеют влияние изменения абразивной среды на износ значительно выше, чем для изношенных.

Так при одной и той же щёлочности работающего масла изменение содержания абразива в два раза приведет к увеличению износа малоизношенных втулок в 1.5 – 2 раза, а изношенных только на 5 – 10%. Область оптимального содержания абразива, установленного по средней изношенности лежит в пределах 0.0009 – 0.0012%.

С атмосферной пылью в двигатель кроме Si в определенном соотношении попадает и Al.

Поэтому корреляционная связь между этими элементами бывает весьма высокой.

Модель срабатывания щелочной присадки целесообразно представить в виде:

$$\text{ЩЧ} = \text{ЩЧ}_0 \cdot e^{-kt},$$

где ЩЧ, ЩЧ₀ - текущее и начальное значение ЩЧ масла;

t - длительность работы масла;

k - константа скорости срабатывания щелочной присадки.

Константа скорости – обобщенный показатель, который включает в себя все особенности процесса срабатывания присадки в системе ДВС-масло. По данным профессора Шарипова К.А. для двигателей с неисправной топливной системой в зависимости от исходной щелочности свежего масла $k = -0.0853 \dots - 0.0997$.

$$\text{ЩЧ} = 4.00 \cdot e^{0.0477t},$$

где t - время работы двигателя от смены масла, 10^2 ч

18.1 Постановка задачи оптимизации пары трения гидросистемы колесной машины.

Рассмотрим абстрактную кибернетическую модель пары трения гидропривода машины (Рис.18.1), в которой $\{U\}$ - вектор внешних воздействий на кару трения, включающий давление P , скорость скольжения V и т.д., т.е. набор кинематических и динамических параметров, определенных j -м режимом эксплуатации машины R_j ;

$\{X\}$ - вектор входных управляющих факторов-параметров узла трения x_i ;

$\{Y\}$ - вектор выходных характеристик системы y_j ;

$\{Z\}$ - вектор неуправляемых входных воздействий на систему z_k .

При заданной (выбранной) структуре системы ее поведение можно описать уравнением

$$Q(\{U\}, \{X\}, \{Z\}) = \{Y\}, \quad (18.1)$$

где Q - некоторый оператор, преобразующий входные макровоздействия в выходные характеристики реакции узла трения.

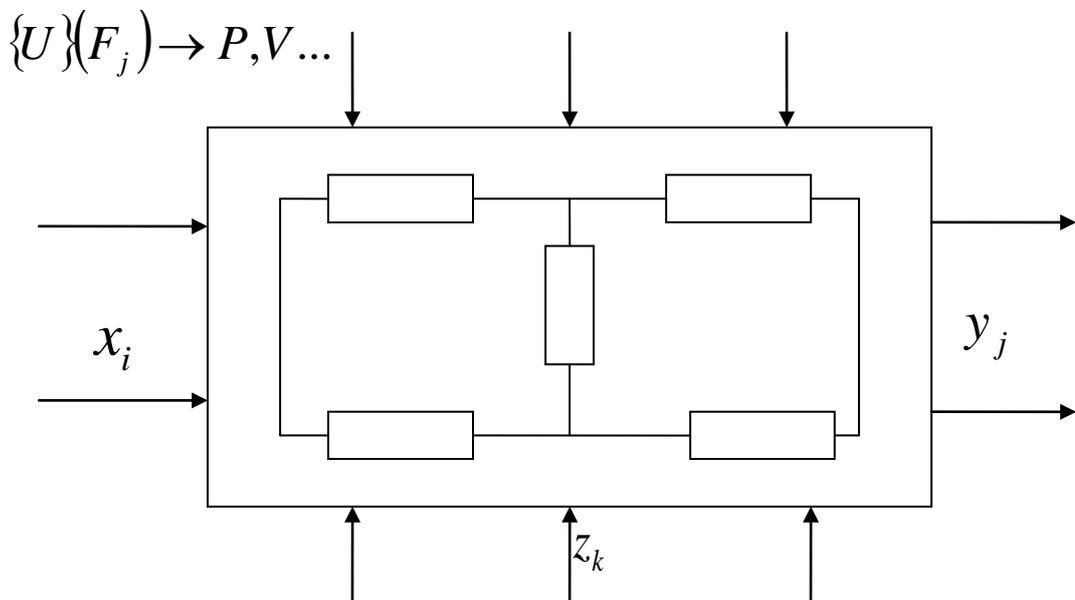


Рис.18.1 Кибернетическая модель оптимизируемой пары трения.

Структура постановки задачи оптимизации представлена на рис.18.2

Критерии качества подразделяются на две группы. К первой относятся, например, интенсивность изнашивания (задача минимизации), ресурс пары трения (максимизация), различные обобщенные экономические и экологические параметры и т.д., а ко второй – минимальные критерии, отражающие стабильность функциональных характеристик. Ограничения накладываются как на количественные, так а на качественные факторы. В первом случае преобладают ограничения – неравенства.

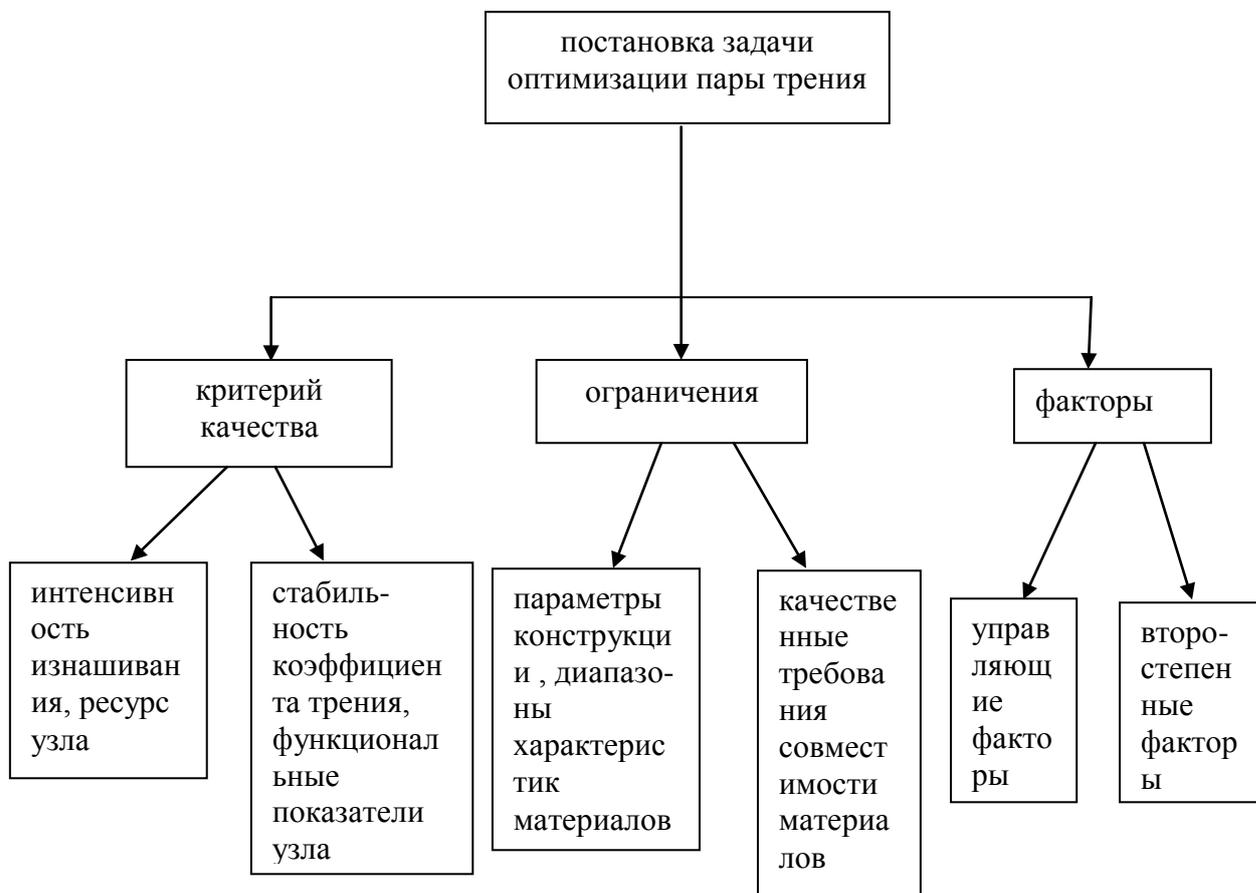


Рис.18.2. Структура постановки задачи оптимизации

Процедура оптимизации, как правило, двухуровневая, состоящая из структурной и параметрической частей. На первом уровне выполняется структурная оптимизация, выбираются классы материалов, конструкция узла трения, назначаются управляющие факторы для последующей параметрической оптимизации. Для выбранного критерия качества – функционала – ставится задача минимизации, (если требуется максимизация, то достаточно поменять знак критерия на противоположный):

$$J(\{Y\}) \rightarrow \min, \quad (18.2)$$

где $J(\{Y\})$ - функционал (критерий качества).

Структурная оптимизация сводится к выбору наилучшего варианта E_i на конечном множестве альтернатив. На этом уровне можно учесть неопределенность режима эксплуатации. При этом применяется недетерминированный подход, который объединяет (статическую) трактовку с идеями и методами теории нечетких множеств. При наличии достаточно полной экспериментальной информации можно строить и использовать регрессионные модели в виде полиномов второго порядка

$$\hat{y} = b_0 + \{x\}^T \{b\} + \{x\}^T [B] \{x\} \quad (18.3)$$

При недостатке статистической информации предлагается применять нечеткие функции такого же вида, унифицировав, тем самым, вероятностный и нечеткий подходы.

При первом модели строятся в соответствии с теорией планирования эксперимента, при этом обязательным является наличие параллельных опытов, вычисление дисперсии воспроизводимости и других статистических характеристик.

Аналогичные нечеткие модели могут приниматься на основании значительно менее обширного экспериментального материала или по результатам компьютерного имитационного моделирования.

В отличие от регрессионных, для нечетких моделей проверка адекватности выполняется не по статистическим критериям, а по степени соответствия экспериментально обнаруженным особенностям поведения целевой функции в исследуемой подобласти факторного пространства. При выборе размера подобласти учитывается, что любая дифференцируемая функция может быть представлена в достаточно малой области сколь угодно точно полиномом второго порядка с помощью многомерного ряда Тэйлора.

Для гидропривода колесной машины описываемая выражением (18.3) поверхность второго порядка имеет в точке с координатами

$$\{x_0\} = -\frac{1}{2}[B']^{-1}\{b\}; \quad \hat{y}_0 = b_0 + 0,5\{x_0\}^T\{b\} \quad (18.4)$$

минимум, если все коэффициенты канонической модели (18.3) положительны, и максимум, если все они отрицательны.

Здесь $\{x_0\}$, $\{y_0\}$ - координаты стационарной точки в многомерном пространстве.

$\{b\}$ - вектор параметров регрессионной или нечеткой модели.

Различные знаки указывают на отсутствие экстремума. Если имеет место первый случай и точка (18.4) входит в область допустимых значений, то она является решением задачи минимизации.

18.2. Математические основы измерения и анализа случайных динамических процессов

Процесс, для которого характерно изменение физической величины во времени случайным образом, называют случайным. Он описывается случайной функцией времени. Когда аргумент случайной функции является пространственной переменной, то такая функция описывает случайное поле. Случайную функцию можно рассматривать как бесконечную совокупность, множество, ансамбль функций, каждая из которых представляет собой одну из возможных реализаций случайной функции.

Случайные функции обозначают большими буквами латинского алфавита: $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$, а реализации - малыми буквами: $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. Таким образом, случайный процесс, описываемый случайной функцией $X(t)$ - это ансамбль, множество реализаций $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_k(t)$, ..., $x_\infty(t)$.

В соответствии с тем, возможен или нет сдвиг начала отсчета вероятностных характеристик во времени, случайные процессы делят на стационарные и нестационарные.

Стационарным называется такой случайный процесс, у которого определенная группа вероятностных характеристик инвариантна во времени, т.е. не изменяется при сдвиге времени - замене аргумента t значением $t + \tau$, где τ - произвольный интервал времени. Различают стационарные процессы в узком смысле и широком смысле.

Случайный процесс называют стационарным в узком смысле, если n -мерные функции распределения вероятностей (n - конечная величина произвольного порядка) не изменяются во времени, т.е. выражения для плотности распределения вероятностей любого порядка не зависят от выбора момента начала отсчета времени. Математически это означает, что для любых n и t справедливо равенство

$$p(x_1, t_1 + \tau; x_2, t_2 + \tau; \dots; x_n, t_n + \tau) = p(x_1, t_1; x_2, t_2; \dots; x_n, t_n) \quad (18.5)$$

Для стационарных в широком смысле случайных процессов характерно, что математическое ожидание и дисперсия не зависят от времени, а корреляционная функция зависит лишь от разности времен.

Случайные процессы, стационарные в узком смысле, стационарны и в широком смысле, но не наоборот.

Нестационарные случайные процессы - это процессы, вероятностные характеристики которых являются функциями времени и зависят от начала отсчета.

Применительно ко многим случайным процессам допустима эргодическая гипотеза. О таких процессах говорят, что они эргодичны по отношению к определенной вероятностной характеристике. Отличительная особенность эргодического процесса заключается в том, что его вероятностные характеристики могут быть получены с вероятностью, сколь угодно близкой к единице, в результате некоторой операции усреднения по времени одной реализации достаточно большой (теоретически бесконечной) длительности.

Эргодическое свойство очень важно для исследования случайных процессов, так как позволяет усреднение по ансамблю заменять усреднением по времени.

Случайные процессы разделяют на непрерывные и дискретные в зависимости от того, непрерывен ли аргумент t по всей оси (на рассматриваемом отрезке) или принимает дискретные значения. Непрерывными (континуум значений) или квантованными могут быть и ординаты случайной функции.

Признаком классификации служит также характер распределения вероятностей случайного процесса, вид кривой плотности распределения. Различают гауссовский, релеевский процессы, процесс с равномерным распределением и т.д.

Особое место занимает гауссовский процесс, охватывающий широкий класс явлений и часто наблюдаемый в технике.

Процесс называют гауссовским, если все его n -мерные плотности распределения вероятностей подчиняются нормальному закону. Подобный закон распределения наблюдается во всех случаях, когда исследуемый

процесс можно представить в виде суммы большого числа независимых или слабо зависимых слагаемых при условии отсутствия среди них таких, значения которых значительно превышают значения большинства остальных.

Основные свойства гауссовского процесса:

1. Случайный процесс исчерпывающим образом определяется законом изменения во времени математического ожидания и корреляционной функции (этим объясняется то, что корреляционная теория дает полное описание гауссовских процессов). Процессы могут отличаться друг от друга значением математического ожидания и видом корреляционной функции.

2. Стационарный в широком смысле гауссовский процесс стационарен и в узком смысле.

3. Сумма двух гауссовских процессов также представляет гауссовский процесс.

4. Некоррелированные гауссовские процессы - процессы независимые.

5. Линейные преобразования гауссовского процесса не меняют его характера.

6. Распределение вероятностной производной гауссовского стационарного процесса, описываемого непрерывной и дифференцируемой случайной функцией, также нормально.

7. Нелинейное преобразование нарушает свойство нормальности процесса.

Зависимость поведения случайной функции от ее значений в предшествующие моменты времени позволяет классифицировать случайные процессы по следующим видам:

а) белый шум - процесс, описываемый случайной функцией, последовательные значения которой статистически независимы от предыдущих значений, как бы ни были малы разделяющие их промежутки времени. Такой процесс полностью определяется одномерной плотностью распределения вероятностей;

б) марковский процесс - процесс, у которого зависимость текущего значения от предистории не распространяется далее непосредственно предшествующего момента. Вероятностные свойства случайной функции, описывающей марковский процесс, полностью определяются двумерной плотностью распределения вероятностей; в) немарковские процессы.

Основой деления случайных процессов на узкополосные и широкополосные является относительная ширина полосы частот (по отношению к средней частоте), в которой главным образом сосредоточен спектр мощности процесса.

Различают случайные, смешанные и квазидетерминированные процессы.

Случайным называют процесс, в котором отсутствуют детерминированные составляющие. От такого процесса отличают смешанный процесс, представляющий собой совокупность случайного процесса и детерминированных составляющих - периодических или

апериодических неслучайных функций времени. Типичным примером - служит аддитивная смесь шума и полезного сигнала.

Квазидетерминированные случайные процессы характеризуются тем, что их реализации описываются функциями времени определенно о вида, содержащими один или несколько случайных параметров, не зависящих от времени. В качестве примера можно привести процесс вида: $x(t) = A \cos(\omega_0 t - \varphi)$, где A и ω_0 - фиксированы, а φ - случайная фаза.

Функция распределения вероятностей случайного процесса, описываемого случайной функцией $X(t)$ в фиксированный момент времени $t = t_1$, определяет вероятность того, что в указанный момент любое значение случайного процесса меньше некоторого значения (уровня) x , которое можно варьировать.

Функция распределения задается соотношением

$$F(x, t_1) = P[X(t_1) < x] \quad (18.6)$$

Для эргодического стационарного случайного процесса функция распределения может быть определена по одной реализации. Она характеризуется относительным временем пребывания значений реализации длительности $T \rightarrow \infty$ ниже заданного уровня X .

Свойства функции распределения:

$$\begin{aligned} F(x, t) &\geq 0, \quad -\infty < x < \infty; \\ 0 < F(x, t) &< 1; \\ F(\infty, t) &= 1; F(-\infty, t) = 0 \end{aligned} \quad (18.7)$$

$F(x)$ - неубывающая функция аргумента x ; график функции повсюду непрерывен слева.

Функция распределения равномерной случайной последовательности определяется зависимостью

$$F(x, iT_0) = P[X(x, iT_0) < x] \quad (18.8)$$

Если случайная последовательность получена выборками из непрерывного случайного процесса его значений в моменты $i T_0$, то функция распределения случайной последовательности не отличается от функции распределения случайного процесса при условии замены t на $i T_0$.

Плотность распределения вероятностей случайного процесса представляет собой производную от функции распределения

$$p(x, t_1) = \frac{\partial F(x, t_1)}{\partial x} \quad (18.9)$$

При этом с точностью до бесконечно малой величины высшего порядка справедливо равенство

$$p(x, t_1) dx = P[x < X(t_1) \leq x + dx] \quad (18.10)$$

Если исследуется стационарный эргодический процесс, то

$$p(x) dx \approx P[x < x(t) \leq x + dx]$$

Основные свойства плотности вероятностей:

$$p(x, t) \geq 0, \forall x$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x, t) dx = F(x, t). \quad (18.11)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x, t) dx = 1$$

Для равномерной случайной последовательности плотность вероятностей определяется выражениями:

$$p(x, iT_0) = \frac{\partial F(x, iT_0)}{\partial x} \quad (18.12)$$

$$p(x, iT_0) dx \approx P[x < X(iT_0) \leq x + dx]$$

Математическое ожидание случайной функции $X(t)$ - такая функция $m_x(t)$, значение которой при каждом данном значении аргумента t равно математическому ожиданию значения случайной функции $X(t)$ при данном t :

$$m_x(t) = M[X(t)] \quad (18.13)$$

Математическое ожидание случайной функции представляет собой некоторую среднюю функцию, около которой группируются и относительно которой колеблются все возможные реализации случайной функции.

Для действительной случайной функции $X(t)$ математическое ожидание может быть вычислено по формуле

$$m_x(t) = M[X(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x, t) dx \quad (18.14)$$

где $p(X, t)$ - плотность вероятности.

У стационарных случайных процессов математическое ожидание не зависит от времени и представляет собой постоянное число. Если процесс не только стационарен, но и обладает эргодическим свойством (по отношению к математическому ожиданию), то у такого процесса среднее по ансамблю равно с вероятностью единица среднему по времени, определяемому по одной реализации:

$$M[X(t)] = \bar{X}(t) \quad (18.15)$$

причем временное среднее $\bar{X}(t)$ находится из формулы

$$\bar{X}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt$$

в предположении, что предел существует.

Если исследуемый случайный процесс представляет собой электрическое напряжение или ток, то среднее значение - это постоянная составляющая напряжения или тока.

Для равномерной случайной последовательности $X(iT_0)$ среднее по ансамблю реализаций

$$m_x(iT_0) = \int_{-\infty}^{\infty} xp(iT_0) dx \quad (18.16)$$

При условии, что случайной последовательности присуще эргодическое свойство, ее математическое ожидание может быть найдено как среднее арифметическое по времени одной реализации

$$m_x = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^N x(iT_0), \quad (18.17)$$

если этот предел существует.

Дисперсия случайной функции (t) есть такая функция, значение которой при каждом данном значении аргумента t равно дисперсии случайной функции при этом значении аргумента

$$D_x(t) = D[X(t)] \quad (18.18)$$

Дисперсия характеризует рассеяние возможных реализаций случайной функции относительно математического ожидания. Она представляет собой центральную моментную функцию второго порядка

$$D[X(t)] = M \{ [X(t) - m_x(t)]^2 \} = \int_{-\infty}^{\infty} [x - m_x(t)]^2 p(x, t) dx \quad (18.19)$$

Для стационарного эргодического случайного процесса выражение дисперсии принимает вид:

$$D_x = M \{ [X(t)]^2 - m_x^2 \} = \bar{X}^2(t) - [\bar{X}(t)]^2 \quad (18.20)$$

и характеризуется постоянным числом.

Если исследуемым случайным процессом является напряжение или ток (сопротивление нагрузки 1 Ом), то член $\bar{X}^2(t)$ соответствует полной средней мощности процесса, член $[\bar{X}(t)]^2$ - мощности постоянной составляющей, а дисперсия D_x - мощности переменной составляющей.

При равномерной случайной последовательности

$$D[X(iT_0)] = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x, iT_0) dx \quad (18.21)$$

Когда процесс стационарен и эргодичен (по отношению к дисперсии), то

$$D_x = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^N x^2(iT_0) \quad (18.22)$$

Дисперсия характеризует рассеяние в квадратичной мере. Поэтому на практике часто используют в качестве подобной характеристики среднее квадратическое отклонение, представляющее собой корень квадратный из дисперсии, взятый со знаком плюс: $\sigma_x = \sqrt{D_x}$. Корреляционная функция случайного процесса характеризует тесноту стохастической связи между значениями случайного процесса в различные моменты времени. В общем случае она является функцией двух аргументов t_1 и t_2 и представляет собой математическое ожидание произведений центрированных значений случайной функции для этих двух аргументов

$$R_x(t_1, t_2) = M \{ [X(t_1) - m_x(t_1)] [X(t_2) - m_x(t_2)] \} \quad (18.23)$$

Значение корреляционной функции при равных значениях аргументов $t_1 = t_2 = t$ дает дисперсию случайного процесса

$$R_x(t, t) = D[X(t)]$$

Корреляционная функция нестационарного случайного процесса графически изображается пространственной фигурой.

Если случайный процесс стационарен хотя бы в широком смысле, то корреляционная функция является функцией лишь разности $\tau = t_1 - t_2$ аргументов, а не их абсолютных значений и принимает одно и то же значение при всех аргументах t_1 и t_2 , отличающихся один от другого на одинаковую величину τ :

$$R_x(\tau) = M \{ [X(t) - m_x][X(t + \tau) - m_x] \} \quad (18.24)$$

Когда случайная последовательность стационарна и обладает эргодическим свойством, корреляционная функция описывается выражением

$$R_x(kT_0) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N + 1} \sum_{i=-N}^N x(iT_0) \cdot x(iT_0 + kT_0), \quad (18.25)$$

где $kT_0 = hT_0 - iT_0$

Для стационарных эргодических процессов можно отметить следующие свойства:

1. При $\tau \rightarrow \infty$

$$R_x(\tau) \rightarrow 0$$

2. Корреляционная функция любой периодической квазидетерминированной функции аргумента t обладает такой же периодичностью при аргументе τ .

Для характеристики взаимосвязи между значениями двух случайных процессов $X(t)$ и $Y(t)$ служит взаимная корреляционная функция, определяемая выражением

$$R_{XY}(t_1, t_2) = M \{ [X(t_1) - m_X(t_1)][Y(t_2) - m_Y(t_2)] \} \quad (18.26)$$

Для характеристики случайного процесса в целом пользуются понятиями спектральной плотности или спектра.

Спектральная плотность $S_x(f)$ стационарного эргодического случайного процесса $X(t)$ выражает среднюю мощность процесса, приходящуюся на единицу полосы частот.

Спектр $S_x(f)$ стационарного случайного процесса связан с корреляционной функцией $R_x(\tau)$ этого процесса парой преобразований Фурье (теорема Винера-Хинчина):

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (18.27)$$

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(f) e^{j2\pi f\tau} df$$

Основные свойства спектральной плотности стационарного случайного процесса:

1. Спектральная плотность неотрицательна, т.е. при любом значении f

$$S_x(f) \geq 0$$

2. При ограниченной дисперсии случайного процесса

$$\lim_{f \rightarrow \infty} S_x(f) = 0$$

3. Спектральная плотность является вещественной функцией f .

4. Спектральная плотность - четная функция, т.е.

$$S_x(f) = S_x(-f)$$

5. Интеграл от спектральной плотности равен дисперсии стационарного случайного процесса

$$D_x = R_x(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(f) df$$

6. Изменение масштаба m аргумента τ корреляционной функции вызывает обратное изменение масштаба частоты f и величины спектральной плотности $S_x(f)$, т.е. если $R_2(\tau) = R_1(m\tau)$, то соответственно

$$S_2(f) = \frac{1}{m} S_1\left(\frac{f}{m}\right)$$

7. Спектральная плотность процесса на выходе линейной системы с постоянными параметрами $S_y(f)$ связана со спектральной плотностью стационарного случайного процесса на входе системы $S_x(f)$ выражением

$$S_y(f) = |K(f)|^2 S_x(f),$$

где $|K(f)|$ - амплитудно-частотная характеристика системы.

С учетом свойств 3 и 4 можно выразить спектральную плотность мощности через корреляционную функцию формулой

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau = 2 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau$$

Взаимной спектральной плотностью стационарно связанных случайных процессов $X(t)$ и $Y(t)$ называют преобразование Фурье от взаимной корреляционной функции этих процессов

$$S_{XY}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XY}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau$$

Основные свойства взаимной спектральной плотности:

1. Взаимная спектральная плотность $S_{xy}(f)$ в общем случае величина комплексная.

Ее вещественная часть $Re S_{xy}(f)$ является четной функцией, а мнимая часть $Im S_{xy}(f)$ - функцией нечетной:

$$Re S_{XY}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XY}(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau \quad (18.28)$$

$$Im S_{XY}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XY}(\tau) \sin 2\pi f \tau d\tau$$

2. Интеграл от взаимной спектральной плотности $S_{xy}(f)$ в бесконечных пределах аргумента f дает взаимную дисперсию случайных процессов:

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_{XY}(f) df = D_{XY} = R_{XY}(0)$$

3. Изменение масштаба аргумента τ взаимной корреляционной функции $R_{XY}(\tau)$ вызывает такие же изменения взаимной спектральной плотности $S_{xy}(f)$, что и изменение масштаба τ функции корреляции $R_{xy}(\tau)$ у спектральной плотности $S_x(f)$, т.е. функция $R_{xy}(m\tau)$ соответствует функции $\frac{1}{m}S_{xy}\left(\frac{f}{m}\right)$

4. Взаимные спектральные плотности $S_{xy}(f)$ и $S_{yx}(f)$ являются комплексно сопряженными величинами и связаны соотношениями

$$S_{yx}(f) = S_{xy}(-f)$$

$$S_{xy}(f) = S_{yx}(-f)$$

Рассмотренными характеристиками не исчерпывается описание случайных динамических процессов, но они являются основными для принятого в пособии математического описания рассмотренных моделей.

Вопросы по теме:

1. Как моделируется процесс изнашивания?
2. Какие элементы – индикаторы присутствуют в масле?
3. Описать линейную двухфакторную модель изнашивания.
4. Как оптимизируются пары трения в гидросистеме машины?
5. Описать кибернетическую модель оптимизируемой пары трения.
6. С помощью какого математического аппарата и как описана структурная схема модели фрикционной динамической системы?
7. Какой случайный процесс называется гауссовским и каковы его свойства?
8. Какими свойствами обладает корреляционная функция стационарного эргодического процесса?
9. Какими свойствами обладает спектральная плотность стационарного случайного процесса?

Вопросы по самостоятельной работе

Описать методы диагностики трибосистем

Литература.

1. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа.-М.;Наука,-1980.

2. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений: Пер. с нем.-М.:Мир.-1990

19. Испытания трибосопряжений на машинах трения

Благодаря развитию теории моделирования трения и износа перво-степенное значение приобретает проведение экспериментов на машинах трения с регламентированной погрешностью. По результатам таких испытаний достаточно успешно удается прогнозировать фрикционно-износные характеристики трибосопряжений реальных машин.

Технические характеристики машин трения приведены в табл.19.1, а схемы испытаний показаны на рис. 19.1. На рис. 19.2 дана блок-схема машины трения для общего случая. Испытательный блок 1 является основным узлом машины трения и предназначен для формирования испытываемой пары трения. Большинство современных машин позволяют проводить испытания образцов разных размеров и по нескольким схемам. С этой целью в испытательный блок входят необходимые для быстрой переналадки узлы крепления образцов и приспособления для их установки. Испытательный блок должен обладать достаточной жесткостью и обеспечивать надежную установку образцов. Соединения элементов испытательного блока не должны иметь люфты. В некоторых случаях блок снабжается специальными устройствами для стабилизации режима испытаний, например температурного, на машине трения УМТ-1.

В испытательный блок конструктивно входит также датчик момента (силы) трения, состоящий из упругого элемента и электрического преобразователя сигнала индуктивного, тензорезисторного или другого типа, функционально являющийся частью системы измерения.

Привод 2 предназначен для сообщения движения одному или нескольким образцам, входящим в узел трения, и включает в себя электродвигатель и передаточный механизм, кинематика которого определяется характером относительного движения трущейся пары. Варьирование скорости испытаний в широких пределах достигается применением тиристорного электропривода с диапазоном плавного регулирования 1:100 и погрешностью поддержания установленной скорости не более 5%. Конструкция передаточного механизма должна обеспечивать плавность движения, без рывков и ударов, особенно учитывая динамический характер процесса трения в испытываемой паре. С этой целью широко применяются передачи гибкой связью, например зубчатыми ремнями, на машине СМТ-1.

Узел нагружения 3 предназначен для создания нормальной нагрузки на образцы. На серийных машинах нагружение осуществляется путем прямого или косвенного приложения нагрузки с помощью рычажно-грузовых, пружинных или пневматических механизмов. Конструкция узла нагружения должна обеспечивать плавность и стабильность режима нагружения независимо от изменения в процессе испытаний момента трения и величины износа.

Камера 4 служит для проведения испытаний в специальных условиях, например при подаче смазки, абразива и т. п. В некоторых случаях она выполняет также защитную функцию, ограждая оператора от продуктов

износа, воздействия шума и других вредных факторов. На серийных машинах камеры часто бывают герметизированы.

Указанные узлы монтируются на общей станине, снабженной в необходимых случаях виброопорами. Такая конструкция должна обеспечивать надежную виброизоляцию машины, работающей в условиях интенсивных динамических нагрузок. Собственно машина трения 5 электрически связана с пультом б, в котором смонтированы блоки управления 7 и измерения 8, за исключением отдельных случаев, когда электрооборудование размещается непосредственно в машине.

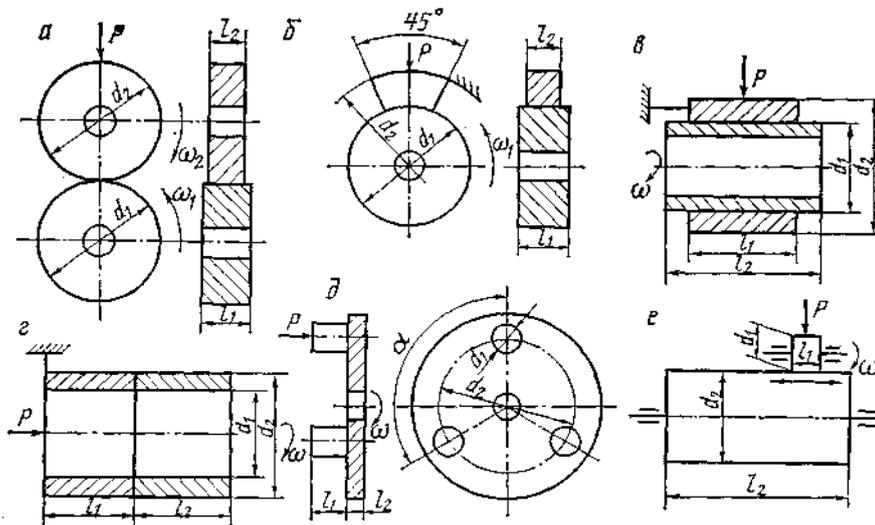


Рис. 19.1. Схемы испытаний на машинах трения: а — диск — диск; б — диск — колодка; в — вал — втулка; г — кольцо — кольцо; д — диск — палец; е — ролик — барабан

На машинах трения измеряются и регистрируются параметры, необходимые для получения полной информации о процессе трения: момент (сила) трения, сила нормального давления, скорость трения (число оборотов образца или контртела), температура в заданной зоне, работа трения, а при необходимости и другие величины.

Машины трения, подобно большинству других типов испытательных машин, градуируются в статике с помощью динамометров, грузов и других средств. При этом динамические эффекты, возникающие в процессе испытаний, не учитываются и во избежание ошибочных результатов должны оцениваться, по крайней мере теоретически, как это делается, например, для усталостных машин. Так, приходится, исходя из времени нарастания микропроцесса, например при фиксировании автоколебаний, сопровождающих часто стационарное трение, назначать верхнюю граничную частоту регистрирующего прибора. Как известно из теории измерительных устройств между этими характеристиками существует следующая зависимость:

$$1/v_g = t_E / 2,$$

где

v_g — верхняя граничная частота регистрирующего прибора;

t_E — время нарастания микропроцесса.

При этом значения t_E и v_g строго регламентированы видом преобразующего и регистрирующего прибора.

Для правильной регистрации формы импульса длительностью t_E необходимо обеспечить отношение

$$t_H/t_E > 5,$$

где t_H —длительность импульса (микропроцесса).

Нарушение этого требования, например, в практике усталостных испытаний, приводит к ошибочному определению расчетной нагрузки и числа циклов до разрушения детали. При этом изделие машиностроения успешно проходит испытательный срок, запускается в серийное производство, и примерно через год эксплуатации во всех машинах в результате допущенной погрешности выходит из строя одна и та же деталь с поломкой в одном и том же месте. В триботехнике такого рода погрешность приводит обычно к ошибочным расчетным данным и в дальнейшем к дополнительным потерям на трение, повышенному износу и перерасходу запасных частей.

Исследование динамики машин трения связано с учетом нелинейностей, в том числе типа «сухое трение», не только существенно влияющих на точность измерений в обычном понимании, но и определяющих качественный характер результатов, включая вид трибограмм и триботехнические характеристики.

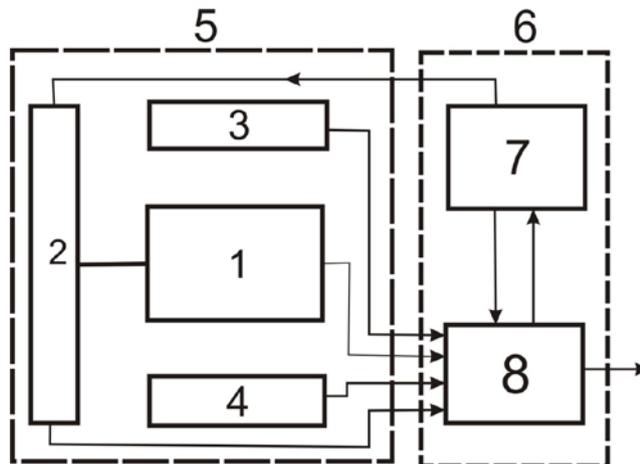


Рис. 19.2. Блок-схема машины трения

В качестве примеров можно указать на возбуждение при определенных условиях в системе машина — образец релаксационных автоколебаний, вибрационную линеаризацию характеристик сухого трения и другие явления, учет которых позволяет не только избежать методологических ошибок, но и повысить информативность при испытаниях.

Улучшение методологических характеристик машин трения достигается различными конструктивными решениями, направленными, в частности, на снижение трения в измерительной системе и исключение взаимного влияния измерения момента (силы) трения и нормальной нагрузки. На машинах МТИ-1 и ТП эта задача решается путем искусственного возбуждения колебаний в измерительной системе. На машине УМТ-1 передача момента

трения осуществляется гибкой связью, обеспечивающей необходимую податливость в направлении приложения нормальной нагрузки. Следует, однако, иметь в виду, что, учитывая динамический характер испытаний и значительный технологический разброс фрикционно-износных показателей пар трения, повышение только статической точности измерений не является достаточно эффективным.

Применение малоинерционных электрических силоизмерителей позволяет регистрировать высокочастотные процессы при трении. Однако возбуждение и параметры возникающих колебаний обусловлены упругочастотными характеристиками испытательного блока, которые сложно моделировать при переходе от натуры к узлу трения лабораторной машины. Поэтому в ряде случаев предусматривается возможность демпфирования этих колебаний и регистрации усредненных значений силы трения. Для этой цели могут быть использованы специальные демпфирующие устройства, как на машине УМТ-1, или непосредственно маятниковые силоизмерители (машина ПТС).

На погрешность измерения оказывают влияние электрические, магнитные и особенно тепловые поля. Так, высокая напряженность (порядка 500 В/м у двигателя мощностью 60 кВт) магнитного и электрического полей наводит в проводах, соединяющих термопару с регистрирующей аппаратурой, напряжение помех не более 10^{-5} В. Очевидно, что искажение температуры на $1\text{--}2^\circ$ имеет значение при испытаниях на легких режимах, когда температура в зоне трения на $15\text{--}20^\circ$ превышает температуру окружающей среды.

Влияние тепла на нагружающие и силоизмерительные устройства не учитывается тарировкой. В результате существенно возрастает погрешность в оценке нормальной нагрузки по сравнению с тарировкой. Единственный способ устранения такого рода погрешности, соизмеримой со значением нормальной нагрузки, - уменьшение температуры рабочего узла либо за счет теплоизоляции, либо с помощью водяного охлаждения. На серийных машинах трения применено интенсивное жидкостное охлаждение по границам рабочего узла, что препятствует распространению тепла к опорам и измерительным устройствам. Известно, что нагрев тензодинамометров при установке их в камере вблизи зоны трения нестандартных машин вызывает значительную погрешность.

Актуальной является проблема внедрения в машинах трения систем автоматической обработки информации, например для анализа трибограмм и статистических характеристик распределения результатов. Для этих целей могут использоваться как ПК, так и специализированные микропроцессоры, которые в дальнейшем должны осуществлять также управление процессом испытаний в целом.

Сложные требования, предъявляемые к машинам трения, делают необходимым разработку комплексных методов оценки их технического уровня. За последние годы заметно возросло количество разрабатываемых стандартов, регламентирующих методы испытаний на трение и изнашивание. При этом почти каждый стандарт предусматривает использование

оригинальной машины, большинство которых промышленностью не выпускаются. Как следствие, значительный объем испытаний проводится на нестандартных машинах, не аттестованных органами Госстандарта и имеющих, как правило, нерегламентированную погрешность. При этом машина чаще всего рассматривается как пассивный элемент метода, влияние которого на результаты не оценивается. Эти два обстоятельства особенно невыгодно отличают рассматриваемую область от других методов механических испытаний материалов, в том числе даже традиционно считающихся статическими.

В условиях, когда влияние конструкции испытательной машины на процесс и соответственно на результаты испытаний существенно, но недостаточно изучено, только использование однотипных машин с нормированными метрологическими характеристиками может обеспечить единство испытаний на трение и изнашивание.

19.1. Метод ускоренных испытаний трибосопряжений машин на износостойкость

Сокращение длительности испытаний на надежность является проблемой, имеющей первостепенное значение.

Ускорение испытаний на износостойкость осуществляется за счет форсирования скорости, нагрузки, применения методов экстраполяции, ужесточения фактора внешней среды, повышения точности измерения параметра. Сложность методов ускоренных испытаний на износостойкость состоит в том, что интенсификация режимов трения (нагрузки, скорости) приводит к существенному изменению полей напряжения, деформаций и температур материалов как в зонах контакта, так и в объемах, что меняет картину разрушения и старения материалов и в конечном счете приводит к переходу одного вида изнашивания в другой со всеми вытекающими отсюда последствиями. Однако непременным условием подобных испытаний является создание аналогичных видов изнашивания и получение линейной зависимости между интенсивностью изнашивания и путем трения, а соответственно и временем испытаний, что не всегда воспроизводимо.

Существенное влияние при испытаниях на износостойкость оказывает и масштабный фактор, поскольку ускорение испытания в лабораторных условиях проводится, как правило, на уменьшенных (иногда в десятки раз) моделях. С изменением же размеров моделей в C_1 раз теплопроводящие объемы изменяются в C_1^3 раз, а теплоотдающие площади — в C_1^2 раз при одинаковой удельной тепловой напряженности на единице площади контактирующих тел и поверхностей теплоотдачи, что существенно отражается на свойствах испытуемого объекта. В подтверждение этого рассмотрим представленные на рисунке зависимости объемной температуры t_v трех геометрически подобных подшипников скольжения из поликапроамида от параметра удельной работы трения $f_p v$, полученные на одной и той же установке при одинаковых внешних условиях (теплоотвод, наружная температура, смазка). Диаметр первого (кривая 1) подшипника $d_1 = 110$ мм, размеры второго (кривая 2) и третьего (кривая 3) подшипников были

Таблица 19.1

Технические характеристики машин трения

Параметр	Модель машины									
	СМТ-1			УМТ-1			МТИ-1	ТП	ПТС	
	методы испытаний									
	нестандартные			нестандартные			ГОСТ 426—77	ГОСТ 1162 9—75	ГОСТ 12251 —77	
	схемы испытаний (рис. 19.1)									
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>в</i>	<i>в</i>	<i>z</i>	<i>∅</i>	<i>∅*</i>	<i>∅*</i>	<i>e</i>	
Размеры образцов, мм										
d_1	35—50	50	30-40	35	20	10	По ГОСТ	По ГОСТ	50 8; 55	
d_2	35—50	68	50	50	28	120—300	136	136	20	
l_1	12	12	10 - 25	20	15	20	8; 10	10; 10	1	
l_2	10	10	30	30	15	120	10	10	50	
Рабочий диапазон момента трения, Н·м		2—20			2 - 40		0,136—3,4	0,136—3,4	1-5	
Число оборотов образца, мин ⁻¹		75—1500			15 - 3000		42; 84; 168	42; 84; 168	350	
Нормальная нагрузка, Н		200-5000		20	3 - 4000		1,3—50	10—70	10— 50	
Диапазон измере-ния температур, °С		0-800			0 - 800				40— 100	
Габаритные размеры машины, мм:	1400x700x1300			760x1700x1600			510x570x560	510x570x560	1400x8 00x950	
Масса машины, кг:	500			1300			70	82	350	

уменьшены соответственно в 2,32 и 2,78 раза.

Как видно, при одном и том же значении t_v работоспособность второго подшипника вдвое, а третьего вчетверо выше работоспособности первого подшипника, который условно можно принять за натуральный образец, т. е. за оригинал.

Для воспроизведения на контактирующих поверхностях исследуемых деталей процессов трения, изнашивания и расхода смазки удобнее создавать условия, аналогичные эксплуатационным, которые включают режимы трения (нагрузку, скорость, температуру), физико-химические свойства материалов и смазок, внешние условия (температуру окружающей среды, характер подачи смазки и абразива и т. д.), конструктивные и технологические особенности (макро- и микрогеометрию поверхностей, термообработку и т. д.).

Воспроизведение процессов трения, изнашивания и расхода смазки будет осуществляться, когда $C_p = C_t = \text{idem}$, т. е. когда $C_p=1$, $C_t=1$, оригинал и модель выполнены из одинаковых материалов и геометрически подобны, а также соблюдено равенство безразмерных соотношений (определяющих критериев)

$$\frac{C_\lambda C_\Delta C_l}{C_\beta C_N C_v C_f} = 1 \quad (19.1),$$

где C_l - соотношение линейных размеров оригинала и модели; C_p —соотношение средних давлений на контактирующих поверхностях; C_v , C_β , C_Δ , C_N —соотношения скоростей скольжения, температур, температурных градиентов, сил в одноименных точках; C_β —отношения коэффициентов разделения тепловых потоков;

— критерия Майера;

$$\frac{C_\alpha C_l}{C_\lambda} = 1, \quad (19.2)$$

где C_λ —соотношение теплопроводностей материалов; C_α —соотношения теплоотдач с поверхностей.

— критерия Био; критерия механического подобия, например, для пары трения подшипник — вал

$$\frac{P_0}{\varepsilon_0 E_{np.o.}} = \frac{P_m}{\varepsilon_m E_{np.m.}}, \quad (19.3)$$

где ε —зазор в подшипнике; P — нагрузка, приходящаяся на единицу длины подшипника; E_{np} —приведенный модуль упругости контактирующих материалов;

для зубчатой пары;

$$\frac{\sigma_{к.о.} \rho_{np.o.}}{E_{np.o.} m_o} = \frac{\sigma_{к.м.} \rho_{np.m.}}{E_{np.m.} m_m}, \quad (19.4)$$

где m —модуль зубчатого зацепления; ρ_{np} —приведенный радиус кривизны шестерни и колеса; σ_k —напряжения в зоне контакта.

Критерии получены из системы дифференциальных уравнений, дающих математическое описание исследуемого процесса, а также граничных условий, характеризующих теплообмен и напряженное состояние на границах контакта трущихся тел

Геометрическое подобие шероховатостей контактирующих поверхностей определяется симплексом Крагельского

$$\left[\frac{(R_z)_{1,2}}{r_{1,2}} \right]_o = \left[\frac{(R_z)_{1,2}}{r_{1,2}} \right]_m \quad (19.5)$$

$$\left[\frac{(R_z)_1}{(R_z)_2} \right]_o = \left[\frac{(R_z)_1}{(R_z)_2} \right]_m \quad (19.6)$$

Согласно третьей теореме подобия, получим равенство неопределяющих критериев, характеризующих трение и изнашивание пар, т. е.

$$f_0 = f_m, \quad u_0 = u_m,$$

где u —удельная массовая интенсивность изнашивания; f —коэффициент трения скольжения.

Критерий Майера (19.1) включает неизвестные f и Δt и может быть определяющим в частных случаях, когда выполнены условия уравнений (19.2) — (19.6). В этих случаях

$$C_u = C_f = C_t = 1 \quad (19.7),$$

что служит условием для проверки сравниваемых режимов и оценки погрешности опытов.

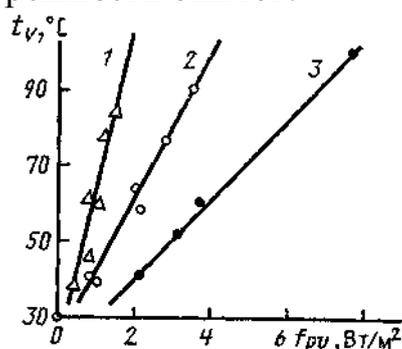


Рис.19.3. Зависимости объемной температуры t_v трения геометрически подобных подшипников скольжения от параметра fpv : 1— $C_t=1$; 2—2,32; 3—2,78

Геометрическое подобие для узлов трения, как правило, легко осуществимо. Для подшипников скольжения, например, оно осуществляется соблюдением равенств

$$(F_{II}/F_B)_0 = (F_{II}/F_B)_m, \quad (L/d)_0 = (L/d)_m, \quad \psi_{п.о.} = \psi_{п.м.};$$

для зубчатых передач

$$(F_{ш}/F_K)_0 = (F_{ш}/F_K)_m, \quad (b_{ш,к}/a_{ш,к})_0 = (b_{ш,к}/a_{ш,к})_m, \quad (m/D_{ш,к})_0 = (m/D_{ш,к})_m.$$

где $F_{II,B}$ —площади поверхностей теплоотдачи подшипника и вала; $F_{ш,к}$ —площади поверхностей теплоотдачи шестерни и колеса; $b_{ш,к}$ —ширина зубчатого венца шестерни и колеса; $a_{ш,к}$ —межосевое расстояние зубчатой

передачи; ψ — относительный зазор между подшипником и валом; $D_{ш,к}$ — диаметр шестерни и колеса;

Согласно второй теореме подобия, процесс изнашивания может быть представлен в виде функциональной зависимости между критериями и симплексами. Для пересчета исследуемых параметров с оригинала на уменьшенную модель и обратно составлена таблица с пересчетными коэффициентами для вариантов ускоренных испытаний: I вариант— для теплонапряженных узлов трения: $C_v=1/C_\ell$, $C_T = C_b$, $C_\alpha = 1/C_\ell$; II — для узлов трения, работающих при больших нагрузках: $C_v=1$, $C_T = C_v=1$, $C_\alpha=1$. Следует обратить внимание на то, что $C_t = idem$ получено при различных требованиях к теплоотдаче (I вариант) и теплопроводности (II вариант).

Как следует из таблицы, для II варианта теплопроводность материала в модели ниже, чем в оригинале; равенство может быть достигнуто увеличением толщины стенок модели. Повышение теплоотдачи с поверхностей модели для варианта I достигается, как правило, обдуванием воздухом с определенной скоростью.

В процессе обработки результатов лабораторных, стендовых или эксплуатационных испытаний, согласно второй и третьей теоремам подобия, можно найти функциональные зависимости в конкретной форме, описывающие процессы трения и изнашивания для рассматриваемых условий ускоренных испытаний.

Таблица 19.2

Формулы и коэффициенты для пересчета параметров с оригинала на уменьшенную модель

Расчетный параметр	I вариант		II вариант	
	расчетная формула	Коэф. пересчета оригинала на модель	расчетная формула	Коэф. пересчета оригинала на модель
Удельная нагрузка Напряжения	$C_p=1$ $C_\sigma=1$ $C_\tau=1$	$p_o=p_m$ $\sigma_o=\sigma_m$ $\tau_o=\tau_m$	$C_p=1$ $C_\sigma=1$ $C_\tau=1$	$p_o=p_m$ $\sigma_o=\sigma_m$ $\tau_o=\tau_m$
Полная нагрузка	$C_N=C_\ell^2$	$N_o=N_m C_\ell^2$	$C_N=C_\ell^2$	$N_o=N_m C_\ell^2$
Скорость скольжения	$C_v=1/C_\ell$	$v_o=v_m/C_\ell$	$C_v=1$	$v_o=v_m$
Время трения (время опыта)	$C_T=C_\ell$	$T_o=T_m C_\ell$	$C_T=C_\ell$	$T_o=T_m C_\ell$
Путь трения	$C_{s\text{ тр}}=1$	$S_{\text{тр. о}}=S_{\text{тр. м}}$	$C_{s\text{ тр}}=C_\ell$	$S_{\text{тр. о}}=S_{\text{тр. м}} C_\ell$
Коэффициент теплоотдачи с поверхностей	$C_\alpha=1/C_\ell$	$\alpha_o=\alpha_m/C_\ell$	$C_\alpha=1$	$\alpha_o=\alpha_m$
Шероховатость поверхностей	$C_h=C_\ell$	$(R_z)_o=(R_z)_m C_\ell$	$C_h=C_\ell$	$(R_z)_o=(R_z)_m C_\ell$

трения				
Геометрическая характеристика шероховатостей	$C_{h/r}=1$	$\left[\left(\frac{R_z}{r} \right)_{1,2} \right]_0 =$ $\left[\left(\frac{R_z}{r} \right)_{1,2} \right]_M$	$C_{h/r}=1$	$\left[\left(\frac{R_z}{r} \right)_{1,2} \right]_0 =$ $\left[\left(\frac{R_z}{r} \right)_{1,2} \right]_M$
Удельный расход смазки и абразива	$C_{\omega c}=1$ $C_{\omega a}=1$	$\omega_{c.o}=\omega_{c.m}$ $\omega_{a.o}=\omega_{a.m}$	$C_{\omega c}=1$ $C_{\omega a}=1$	$\omega_{c.o}=\omega_{c.m}$ $\omega_{a.o}=\omega_{a.m}$
Удельная массовая интенсивность изнашивания	$C_u=1$	$u_o=u_m$	$C_u=1$	$u_o=u_m$
Линейная интенсивность изнашивания	$C_I=1$	$I_o=I_m$	$C_I=C_\ell$	$I_o=I_m C_\ell$
Коэффициент трения	$C_f=1$	$f_o=f_m$	$C_f=1$	$f_o=f_m$
Температура	$C_t=1$	$t_o=t_m$	$C_t=1$	$t_o=t_m$
Теплопроводность материала	$C_\lambda=1$	$\lambda_o=\lambda_m$	$C_\lambda=C_\ell$	$\lambda_o=\lambda_m C_\ell$

$C_{\omega c}$ и $C_{\omega a}$ —отношения удельных расходов смазки и абразива; C_h —соотношения шероховатостей (R_z) поверхностей трения; $C_{s,тр}, C_T$ — соотношения путей и времен трения;

$C_{h/r}$ —отношение средней высоты h к радиусу закругления r неровностей поверхностей трения; C_σ и C_τ — отношения нормальных и касательных напряжений;

В частных случаях испытания могут быть упрощены. Например, установлено, что течение смазки в зазоре подшипников и зубчатых передач по неровностям рельефа поверхностей при граничном трении происходит при автомодельном ламинарном режиме. Процесс ее движения, представленный в критериальной форме, будет определяться критерием Лагранжа вида $Eu \cdot Re = La = \text{const}$, где $Eu = \Delta p / \rho_c v_c^2$ — критерий Эйлера; $Re = v_c l / \nu_c$ — критерий Рейнольдса.

Для подшипников скольжения со смазкой маслом типа И-20А принимают $Eu \cdot Re \approx 1,45 \cdot 10^7$; при работе на пластичной смазке типа УС — $Eu \cdot Re^{1/2} \approx 10^{12}$; для зубчатых передач (при $\sigma_k = 500$ МПа) со смазкой маслом АС-8 — $Eu \cdot Re^{1,09} = 0,9226$, маслом МС-20 — $Eu \cdot Re^{1,237} = 0,2679$, нигролом Л — $Eu \cdot Re^{1,053} = 0,383$. В данном случае процесс течения смазки будет зависеть от ее расхода, а также от геометрических форм, шероховатости поверхностей, площади боковых зазоров.

Подшипниковые пары (сталь 45— поликапроамид, бронза ОЦС5-5-5, чугун СЧ18-24, сталь 30) и зубчатые передачи (сталь 45) испытывались при граничном трении и без смазки, без абразива и с добавлением его.

Было установлено удовлетворительное совпадение исследуемых параметров для обоих вариантов. Различие полученных значений параметров для оригинала и модели составило по износу 2—24%, коэффициенту трения — 0—20%, температуре — 0—25%.

По мере износа пар трения происходят изменения контактной жесткости (Рис.19.4). Кроме того, микротвердость не является постоянной и изменяется по глубине поверхностного слоя детали (Рис.19.5).

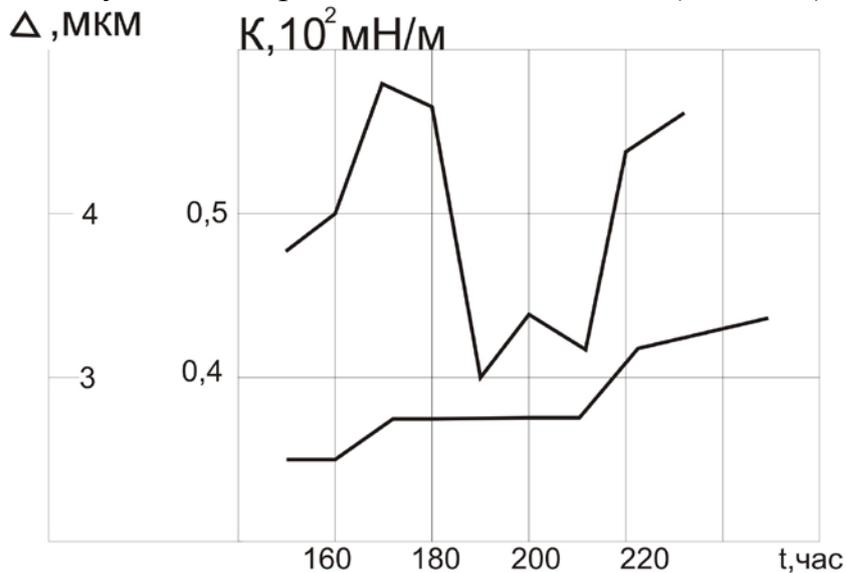


Рис.19.4.Циклические изменения контактной жесткости по мере течения износа поверхностного слоя.

Цикл изменения контактной жесткости составляет 20 часов непрерывной наработки

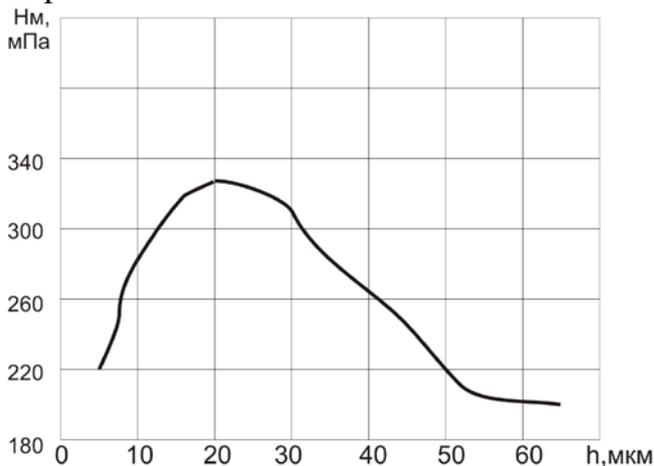


Рис. 19.5. Распределение микротвердости по глубине.

Наибольшая твердость наблюдается не на поверхности, а на глубине порядка 10-20мкм

Вопросы по теме:

1. Основные схемы испытаний на машинах трения
2. Рассказать о конструктивных решениях измерительных систем машин трения

3. Каково охлаждение по границам рабочего узла?
4. Как обрабатываются результаты испытаний?
5. Какие параметры можно получить на машине трения?

Вопросы по самостоятельной работе

1. Дать схему машины трения, описать ее устройство и работу.

Литература

1. Браун Э. Д., Евдокимов Ю. А., Чичинадзе А. В. Моделирование трения и изнашивания в машинах.— М.: Машиностроение, 1982, с. 110—127.
2. Краус Ж., Бошни Э. Измерительные информационные системы.— М.: Мир, 1975, с. 92—104.
3. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машины. Справочник. М., Машиностроение, 1983, с. 320
4. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Под общей ред. А.В. Чичинадзе – М.. Машиностроение, 2001

20. Триботехнологии XXI века в Узбекистане

В последнее время в уплотнительных и подшипниковых узлах транспортных машин, работающих без смазочного материала, стали широко применяться покрытия из композиционных материалов. В связи с этим требуют своего решения задачи о контакте упругого слоя произвольной толщины и жесткого цилиндра при наличии сил трения в области контакта.

Получают аналитическое решение нестационарные задачи теплопроводности и соответствующие задачи термоупругости для трибосистем, состоящих из слоя, скользящего с постоянной скоростью по поверхности полубесконечного основания.

Получены кинетика и распределение температур, интенсивностей тепловых потоков и термоупругих перемещений в элементах различных пар трения.

Повышение ресурса узлов трения стало достигаться разработкой способов упрочнения поверхностного слоя деталей или способов нанесения покрытий с заданным набором функциональных характеристик.

С этой целью изучаются триботехнические характеристики и механизм изнашивания различных пленочных нанокompозитов (например, никель – смешанный оксид вольфрама и молибден).

Получают продолжение современные методы определения динамической твердости, например, такие как наноиндентирование, которые интенсивно развиваются вместе с тонкопленочными технологиями.

Реализация метода наноиндентирования требует сложного дорогостоящего оборудования, поэтому прямое экспериментальное определение микротвёрдости тонких покрытий с использованием распространенных и доступных приборов является также актуальной задачей.

Особое внимание уделяется экологической чистоте узлов трения транспортных машин и другого оборудования наземных транспортных систем.

Частично эта проблема решается сейчас за счёт исключения масляной смазки узлов трения и использования естественной водяной смазки (например, в углепластинах с эпоксидной или фенолформальдегидной матрицами работающих в условиях граничного трения скольжения различными металлическими контртелами).

Потребности машиностроения ставят перед материаловедением задачу разработки новых конкурентоспособных смазочных материалов различного функционального назначения с высокими эксплуатационными характеристиками.

В быстро развивающейся области республики - трибологии автомобилестроения - необходимо гарантировать трибологическую надежность в условиях изнашивания температур от -20 до $+50^{\circ}$ C, повышенной запыленности воздуха - до 10 г/м^3 (на уровне расположения воздухоочистителя); различных группах дорог и рельефов местности с высотой

над уровнем моря: равниной до 1000 м, слабохолмистой до 1500 м, холмистой до 2000 м, гористой до 2500 м, горной до 3000 м, высокогорной свыше 3000 м.

Большие требования в ДВС предъявляются и к качеству смазочного материала.

Идеальным с точки зрения трибологии ДВС явился бы смазочный материал, снабженный высокотемпературной присадкой с мощным антифрикционным и противоизносным действием и обладающий пологой вязкостно-температурной характеристикой.

Ведущие моторостроительные и нефтяные зарубежные фирмы интенсивно ведут поиск, разработку и внедрение смазочных композиций на основе перспективных материалов.

Критериями перспективности присадок для моторных масел, как правило, служат:

- 1) химмотологическая совместимость присадки с моторным маслом (степень растворимости присадки в масле, стабильность дисперсности);
- 2) трибологическая эффективность, т.е. степень снижения коэффициента трения и интенсивность изнашивания;
- 3) функциональная адаптация к режиму работы пар трения ДВС (сохранение свойств присадки в условиях возникающих температур, относительно скоростей, давлений в контакте);
- 4) минимум отрицательных воздействий на эксплуатационные параметры масла.

В настоящее время остро стоит проблема повышения технического уровня нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ), углубления переработки нефти, повышения эксплуатационной надежности и экологической безопасности вырабатываемых нефтепродуктов. Известно, что ценнейшими компонентами моторных топлив, минеральных масел и растворителей, определяющих их эксплуатационно-экологические параметры, являются изо-парафино-нафтеновые углеводороды: чем больше содержится в нефтепродуктах изо-парафино-нафтеновых углеводородов и меньше тяжелых ароматических, нафтено-парафиновых и органических соединений, содержащих серу, азот, кислород и металлы, тем выше эксплуатационно-экологические качества и стабильность нефтепродуктов к хранению. Такие нефтепродукты ранее получали из специальных нефтей так называемых нефтей с нафтеновой основой. Теперь ресурсы таких нефтей исчерпаны, и на переработку поступают все больше тяжелые высокосернистые и высокопарафинистые нефти с малым содержанием «светлых» нефтепродуктов. Производить из таких нефтей топливно-смазочные материалы, отвечающие современным жестким требованиям, можно только при помощи гидрогенизационных процессов на специальных многофункциональных катализаторах, под действием температуры и давления водорода. Других альтернатив нет. В Узбекистане катализаторы для

нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности не вырабатываются; нет и процессов, углубляющих переработку нефти.

Используемые в настоящее время на НПЗ РУз в каталитических процессах импортные $Al_2O_3 - CO(Ni)O - MoO_3$ катализаторы не дают желаемых результатов как по углублению переработки нефти, так и по повышению эксплуатационно-экологических качеств производимых нефтепродуктов. Объясняется это тем, что активность и функциональность известных промышленных катализаторов ограничены. По этой причине нефтеперерабатывающая промышленность РУз значительно отстаёт от ведущих нефтяных компаний мира, а нефтепродукты, вырабатываемые на НПЗ, не соответствуют жестким требованиям мирового стандарта; глубина переработки нефти низка и не превышает 54% против 65-93 за рубежом. Это обусловлено малым масштабом применения на НПЗ РУз высокотехнологических гидрогенизационных процессов, позволяющих вырабатывать моторные топлива, смазочных масел, растворители другие из нефтяных остатков, их смолистых веществ, сернистых, азотистых, кислородных и металлсодержащих компонентов, а также побочных продуктов нефтепереработки, обработанных нефтепродуктов и т.п.

Из-за недостатка мощностей на отечественных нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) глубина вторичных процессов переработки нефти едва достигает 54%.

Всё ещё высок объем производства мазута. Часть этого продукта сжигается в топках электростанций, а другая часть по низким ценам экспортируется за рубеж, где путём дальнейшей его углубленной переработки получают вполне конкурентоспособные высококачественные светлые нефтепродукты.

В то же время вертикально – интегрированные нефтегазовые компании США, России и стран западной Европы основную часть дохода получают не от продажи сырой нефти или газа, а от продажи продукции нефтегазопереработки: особенно продукции предприятий нефтехимической и газохимической промышленности, конечными продуктами которых являются шины и резинотехнические изделия; пластмассы для машиностроения и быта; ткани и изделия для легкой промышленности; лекарственные препараты и многое другое.

По мере углубления химической переработки первичных нефтехимических и газо-химических полупродуктов (этана, пропана, бутанов и т.д.) и получения из них синтетических полимеров и химических продуктов происходит стремительный рост цен на продукцию нефтегазохимической промышленности.

Стратегия же корпорации «Узбекнефтегаз» строится не с ориентацией на глубину вторичных процессов переработки, а на экспорт, поскольку он даёт для Узбекистана хотя и незначительную, но мгновенную прибыль. В связи с этим средства вкладываются в разработку новых месторождений на территории республики и дальнейшее увеличение добычи. В то же время с

ростом доходов от экспорта сырья доллары Узбекистана работают на экономику стран-потребителей сырья.

Мы считаем, что при привлечении западных технологий, создании совместных производств, выделении средств на восстановление нефтеперерабатывающих предприятий, вместо расширения нефтедобычи, даст впечатляющий результат уже через 7-10 лет.

Глубина переработка энергоресурсов приводит к стабилизации производства и увеличению числа рабочих мест.

Усиление же сырьевой направленности нашего экспорта в конечном итоге ведёт к снижению жизненного уровня населения.

Для стимулирования более глубокой переработки углеводородного сырья необходимо:

разработать и ввести в действие системы экономического стимулирования производства экологически чистых моторных топлив и других нефтепродуктов; скоординировать и отрегулировать соотношение потребления и экспорта нефти и нефтепродуктов; создать собственную шинную промышленность.

В перспективе желательна оптимизация пакета функциональных присадок с позиций минимизации трения и износа, при этом пакет присадок, модификатор трения и базовое масло должны достичь максимального эффекта.

Для сравнительной оценки эффективности противоизносного и противозадирного действия добавок в масло используется величина γ относительного изменения износа при добавлении присадки:

$$\gamma = \frac{d_m - d_{mp}}{d_m} \cdot 100\%$$

где: d_{mp} - средний диаметр пятен износа на нижних шарах после опытов в масле с присадкой;

d_m - то же после опытов в масле без присадки.

Испытания обычно проводятся на четырех шариковом трибометре при различных нагрузках и скоростях скольжения. При этом заданная нагрузка и скорость скольжения в процессе каждого опыта не меняются.

Предварительная подготовка шаров для исследования поверхностей трения осуществляется путем последовательного промывания (обычно трехкратного) нижних шаров, использованных в опытах с присадками в углеводородном растворителе (гептане или гексане).

Состав поверхностных слоев должен оказывать существенное влияние на эффективность изучаемых добавок как противоизносных присадок. Эффективность действия добавок оценивается по величинам относительного изменения диаметра пятна износа при добавлении присадки.

Естественно, что наибольшая противоизносная эффективность изучаемого соединения будет выражаться наибольшим положительным значением величины γ .

При большем содержании в поверхностных слоях активных элементов присадки эффективность действия добавки возрастает, но эта зависимость не

линейна. Большая концентрация серы и цинка на поверхности соответствует более высокой активности добавок как противоизносных агентов.

Ассортимент пластичных смазок антифрикционного назначения, используемых в машиностроении Узбекистана, насчитывает многие десятки наименований.

Однако общемировая тенденция на повышение экологичности смазочных материалов, в частности за счёт создания биоразлагаемых смазочных материалов свидетельствует о необходимости разработки в ближайшее десятилетие новых смазочных средств не требующих специальной утилизации. Например, введение диоксида кремния в состав смазочной композиции на основе рапсового масла методом золь-гель технологии позволяет получить новую силикагелевую смазку, по своим эксплуатационным свойствам находящуюся на уровне промышленной смазки литол-24, широко применяемый в транспортном машиностроении республики. Такая смазка содержит только экологически безопасные и биоразлагаемые компоненты: рапсовое масло, гудрон растительных масел, технический жир и диоксид кремния.

Доказано, что наилучшие износостойкие свойства углепластики проявляют в паре с оловянистой бронзой.

Много новых теоретических подходов используется при испытаниях новых смазочных материалов.

В настоящее время одной из наиболее распространенных лабораторных установок для трибологических испытаний смазочных материалов (СМ) является четырехшариковая машина (ЧШМ), изобретенная Г.Берлаге ещё в 30-х годах XIX века.

Её отличают высокая однородность испытательных образцов (стандартных шаров) и высокая воспроизводимость результатов экспериментов. Ряд методик испытаний, реализуемых на этой установке связан с изучением кинетики изнашивания шаров в исследуемых смазочных материалах. Через определенные промежутки времени процесс изнашивания на стандартной ЧШМ приостанавливается, замеряются пятна износа на нижних шариках, после чего процесс изнашивания при постоянных нагрузке и частоте вращения шпинделя машины продолжается – и так до окончания требуемой наработки общей продолжительностью 4 часа.

Методика предусматривает достаточно длительный эксперимент с не менее чем двухкратным повторением.

Поэтому в настоящее время теоретически обосновано сокращение объёма испытаний и количества испытываемых образцов (как проб СМ, так и шаров) без потери получаемой информации путем изменения плана эксперимента на основании представлений об испытании, как об эргодическом стационарном процессе, для которого допустима замена традиционного осреднения информации по множеству реализаций (например, вместо трех повторных испытаний через 4 мин рекомендуется проводить по одному испытанию через каждую минуту).

При этом исключаются операции дополнительной сборки узла трения машины, сокращается расход шаров, уменьшается количество исследуемого СМ, что очень важно в настоящее время при разработке новых смазочных композиций.

В настоящее время на транспортных машинах внедряют новые узлы и детали из пластмассы. Так компания Komatsu сообщила о создании новой серии колесных мини-погрузчиков WA30 и WA40, отличающихся пластмассовыми кожухами, на которых устанавливается сиденье оператора, и другими вспомогательными компонентами. Для этих целей выбрана жидкая формовочная смола «Metton» фирмы Hercules, которая ранее использовалась как альтернатива листовому формовочному материалу при производстве изделий для панелей фургонов, нижних панелей легковых автомобилей для снижения влияния воздушного клина и др.

В результате использования нового материала удалось снизить число деталей на 25 %, объединив многие стальные штамповки и изготовленные ручным формованием детали предыдущих аналогичных машин. На погрузчиках серии WA — это капот, панель пола, кожух, крышка, решетка радиатора, а также правое и левое крылья, масса снижена почти на 50 %.

Смола «Metton» имеет модуль упругости 2110 МПа, в то время как у стали он составляет 211 200 МПа. Но, для разработок деталей из смолы «Metton», в данном случае не требуется жесткости стали. Этой смоле можно придать определенную жесткость, например, при изготовлении верхней части крыла, на которую наступают. С целью увеличения прочности детали, используемые Komatsu, усилены ребрами.

Благодаря применению пластмассовых компонентов в своей продукции компания Komatsu сэкономила 33 % производственных площадей на сборочном заводе.

Этот передовой опыт используется и у нас на заводах Узбекистана.

В республике действует научная программа «Повышение надежности систем «машина-человек—среда», посвященная принципам создания надежной техники и ресурсосберегающих технологий. Разработаны научные основы эффективных средств автоматизации управления и интеллектуальной поддержки деятельности человека-оператора для систем «машина—человек—среда» технологического, транспортного, энергетического и сельскохозяйственного назначения.

Эффективная и безопасная эксплуатация сложных машин невозможна без совершенных систем управления, контроля, сигнализации, их резервирования, дублирования и т. д. Однако новая трактовка роли человеческого фактора в научно-техническом прогрессе предполагает необходимость усиления фундаментальных исследований систем «машина—человек—среда» в целом. Предстоит проанализировать взаимодействие основных элементов и звеньев этих, систем с учетом возможностей человека-оператора. Нужно создать ему комфортные условия для работы, защитить от вредных воздействий, предложить дополнительные средства поддержки действий оператора. К таким средствам, например,

относится вибротактильная передача информации оператору машины, основанная на достижениях вибрационной биомеханики.

Одним из перспективных классов материалов триботехнического назначения являются порошковые антифрикционные материалы (ПАМ). Под порошковыми следует понимать материалы, полученные консолидацией порошков.

Так как практически все ПАМ являются композиционными, их целесообразно классифицировать по материалу матрицы. Именно она определяет основные физико-химические характеристики, а процесс создания ПАМ сводится к изменению ее свойств.

В самом общем виде по типу матрицы ПАМ можно выделить четыре класса материалов. Это металлические, полимерные, углеродные и керамические материалы.

При трении металлических поверхностей обычно возникают металлические связи с энергией 0,4 - 4 мДж/моль, которая на 1 - 2 порядка больше энергии Ван-дер-Вальсового взаимодействия.

Данный недостаток при создании материалов преодолевают введением в металлическую матрицу твердых смазок, уменьшающих адгезионное взаимодействие, наполнителей, снижающих пластическую деформацию поверхностных слоев, а также легированием

Большое количество ПАМ создано на основе железа и полимеров.

В узлах трения применяют карбидные, нитридные, боридные керметы, релит и др.

Материалы на основе полимеров обладают высокими антифрикционными свойствами, это, пожалуй, единственный класс антифрикционных материалов, который при трении без смазки может обеспечить значение коэффициента трения менее 0,1.

Важными их преимуществами являются коррозионная стойкость в различных средах, технологичность, незначительная масса, низкий уровень шума при эксплуатации.

Несмотря на неоспоримые достоинства, полимерные материалы имеют недостатки: нестабильность конструктивных размеров под влиянием температуры и давлений, недостаточная механическая прочность и быстрое старение, низкая стойкость к абразивному износу. Полимеры могут также являться источником водородного износа, так как выделение водорода при трении пластмасс ведет к наводороживанию и охрупчиванию стальной поверхности.

Важнейшая роль в обеспечении надежности принадлежит экологически чистым технологиям, основанным на достижениях фундаментальных наук,— лазерным закалке и легированию, ионному имплантированию, вакуумному ионно-плазменному напылению металлов и соединений. При этом для обоснования энерго-, материало- и трудосберегающих технологических процессов большое значение имеет использование нетрадиционных закономерностей физико-механического поведения материалов в специальных условиях. К таким закономерностям

относятся эффекты сверхпластичности и повышения пластичности труднодеформируемых тел под влиянием импульсных электрических воздействий, водородного пластифицирования металлов и сплавов, изменения структурных и механических состояний материалов при высоких давлениях. Реализация прогрессивных технологий требует создания совершенных методов управления качеством поверхностного слоя с целью повышения ресурса трибосопряжений, других узлов и элементов технических систем.

Разработанные прогрессивные технологии лазерной закалки и наплавки, нанесения износостойких высокотемпературных покрытий успешно освоены передовыми отраслями промышленности. Благодаря этому удалось многократно повысить работоспособность ответственных деталей, которые лимитировали общий ресурс изделий машиностроения. Теперь предстоит внедрить прогрессивные технологии во все отрасли машиностроения республики, учитывая при этом результаты социально-экономического анализа.

Предусматривается создание теоретических основ интегрированных технологий для получения армированных машиностроительных конструкций. В соответствии с этой технологией материал и элемент конструкции изготавливаются в едином процессе, что приводит к значительной экономии ресурсов и снижению материалоемкости. Например, использование в автомобилестроении армированных элементов конструкции, полученных с помощью новых технологий, позволит уменьшить примерло на 35% массу машин, на 6% — удельный расход топлива, увеличить полезный груз, скорость и сократить объем ремонтных работ и удлинить межремонтный период, снизить эксплуатационные затраты.

Результаты теоретического анализа и экспериментальные данные помогут обосновать применение для армирования принципиально новых наполнителей (ленточных, профильных, пластинчатых и др.), которые обеспечат многократное повышение характеристик прочности, жесткости, демпфирующей способности, трещиностойкости (по сравнению с традиционными конструкционными металлическими материалами). Предстоит также изыскать эффективные методы совершенствования армированных элементов машиностроительных конструкций.

Разработка методов механики армированных элементов конструкций позволит создать научно обоснованные модели для прогноза уже на этапе проектирования машин их надежности и долговечности в реальных условиях эксплуатации. При этом будут найдены уравнения состояния, учитывающие структурные и фазовые изменения как функции интенсивности и предыстории экстремальных воздействий.

Интегрированные технологии армированных элементов машиностроительных конструкций открывают перспективы создания комбинированных металл-композитных несущих узлов, жаро- и коррозионно-стойких покрытий, обеспечивающих ограниченный теплоотвод и акустические развязки на путях распространения вибраций и акустических полей.

При разработке научных основ экологически чистой техники, уделяется особое внимание такой фундаментальной проблеме, как использование в перспективных машинах новых энергоносителей и преобразователей, и в частности альтернативных видов топлив.

В настоящее время в машиностроении республики получают новое развитие следующие проблемы триботехники:

- внедрение синергетического и термодинамического подходов в ряд разделов трибологии с целью разработки новых методов борьбы с изнашиванием машин;

- совершенствование процессов ФАБО с целью повышения надежности работы транспортных машин;

- создание новых эффективных смазочных материалов для транспортных машин;

- разработка узлов трения без смазочного материала с сервовитной пленкой;

- разработка научных основ прогнозирования и управления процессами изнашивания пар трения.

К концу 2008 года в мире будет миллиард персональных компьютеров, а к 2013 году, как ожидается, их количество возрастет до двух миллиардов. Это позволит решать более сложные многокритериальные задачи трибологии.

Вопросы по теме:

1. Какие проблемы трибологии предстоит решать в XXI веке
2. Экологичность смазочных материалов.
3. Совершенствование методик испытаний материалов на машинах трения
4. Перспективы внедрения на машинах деталей из пластмассы
5. Экологически чистые технологии в триботехнике.
6. Стратегия нефтегазохимической промышленности Узбекистана.

Вопросы по самостоятельной работе

Описать новые подходы к изучению триботехники

Литература

1. Александров В.М., Коваленко Е.В. Задачи механики сплошных сред со смешанными граничными условиями. –М., Наука, -1986
2. Гивурин М.К. Лекции по методам вычислений - М., Наука, -1971
3. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. –М., Наука, -1991
4. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. – М., Наука, -1976
5. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М., Мир, -1989
6. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. –М., Наука, -2001.

Основные термины и определения, применяемые в триботехнике

Внешнее трение		Явление сопротивления относительно перемещению, возникающему между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии.
Изнашивание		Процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.
Износ		Результат изнашивания, определяемый в установленных единицах.
Износостойкость		Свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания
Смазочный материал		Материал, вводимый на поверхности трения для уменьшения силы трения и (или) интенсивности изнашивания
Смазка		Действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшается сила трения и (или) интенсивность изнашивания
Смазывание		Подведение смазочного материала к поверхности трения
Трение покоя		Трение двух тел при микросмещениях до перехода к относительному движению
Трение движения		Трение двух тел, находящихся в относительном движении
Трение смазочного материала	без	Трение двух тел при отсутствии на поверхности трения введенного смазочного материала любого вида
Трение смазочным материалом	со	Трение двух тел при наличии на поверхности трения введенного смазочного материала любого вида
Трение скольжения		Трение движения, при котором скорости тел в точке касания различны по величине и направлению или по величине или направлению
Трение качения		Трение движения двух твердых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы

	по величине и направлению
Сила трения	Сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленная к общей границе между этими телами
Наибольшая сила трения покоя	Сила трения покоя, любое превышение которой ведет к возникновению движения
Предварительное смещение	Относительное микросмещение двух твердых тел при трении в пределах перехода от состояния покоя к относительному движению
Скорость скольжения	Разность скоростей тел в точках касания при скольжении
Коэффициент трения	Отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу
Поверхность трения	Поверхность тела, участвующая в трении
Коэффициент сцепления	Отношение наибольшей силы трения покоя двух тел к нормальной относительно поверхностей трения силе, прижимающей тела друг к другу
Механическое изнашивание	Изнашивание в результате механических воздействий
Коррозионно-механическое изнашивание	Изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и (или) электрическим взаимодействием материала со средой
Абразивное изнашивание	Механическое изнашивание материала в результате в основном режущего или царапающего действия на него твердых частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии
Эрозионное изнашивание	Механическое изнашивание в результате воздействия потока жидкости и (или) газа
Гидроэрозионное (газоэрозионное) изнашивание	Эрозионное изнашивание в результате воздействия потока жидкости (газа)
Гидроабразивное (газоабразивное) изнашивание	Абразивное изнашивание в результате действия твердых частиц, взвешенных в жидкости (газе) и перемещающихся относительно изнашивающегося тела
Усталостное изнашивание	Механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя.
Кавитационное	Гидроэрозионное изнашивание при движении

изнашивание		твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает местное повышение давления или температуры
Изнашивание заедании	при	Изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность
Окислительное изнашивание		Коррозионно-механическое изнашивание, при котором основное влияние на изнашивание имеет химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой
Изнашивание фреттинге	при	Механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях
Изнашивание фреттинг-коррозии	при	Коррозионно-механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях
Электроэрозионное изнашивание		Эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока
Предельный износ		Износ, соответствующий предельному состоянию изнашивающегося изделия или его составной части.
Допустимый износ		Значение износа, при котором изделие сохраняет работоспособность.
Местный износ		Износ на отдельном участке поверхности трения
Эпюра износа		Графическое изображение распределения значений местного износа по поверхности трения или по определенному ее сечению
Скорость изнашивания		Отношение значения износа к интервалу времени, в течение которого он возник.
Интенсивность изнашивания		Отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или объему выполненной работы.
Скачкообразное движение при трении		Явления чередования относительного скольжения и относительного покоя или чередования увеличения и уменьшения относительной скорости скольжения, возникающее самопроизвольно при трении движения.
Схватывание трении	при	Явление местного соединения двух твердых тел, происходящее вследствие действия

	молекулярных сил при трении
Перенос материала	Явление при трении твердых тел, состоящее в том, что материал одного тела соединяется с другими, и, отрываясь от первого, остается на поверхности второго
Заедание	Процесс возникновения и развития повреждений поверхностей трения вследствие схватывания и переноса материала.
Задир	Повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения
Царапание	Образование углублений на поверхности трения в направлении скольжения при воздействии выступов твердого тела или твердых частиц
Отслаивание	Отделение с поверхности трения материала в форме чешуек при усталостном изнашивании
Выкрашивание	Отделение частиц материала при усталостном изнашивании, приводящее к образованию ямок на поверхности трения
Приработка	Изменение геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющееся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания
Газовая смазка	Смазка, при которой разделение поверхностей трения деталей осуществляется газовым смазочным материалом
Жидкостная смазка	Смазка, при которой полное разделение поверхностей трения деталей осуществляется жидким смазочным материалом
Твердая смазка	Смазка, при которой разделение поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении, осуществляется твердым смазочным материалом
Гидродинамическая (газодинамическая) смазка	Жидкостная (газовая) смазка, при которой полное разделение поверхностей трения осуществляется в результате давления, возникающего в слое жидкости (газа) при относительном движении поверхностей
Гидростатическая (газостатическая) смазка	Жидкостная (газовая) смазка, при которой полное разделение поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении или покое, осуществляется в результате поступления

Эласто- гидродинамическая смазка	жидкости (газа) в зазор между поверхностями трения под внешним давлением
Граничная смазка	Смазка, при которой характеристики трения и толщина пленки жидкого смазочного материала между двумя поверхностями, находящимися в относительном движении, определяются упругими свойствами материалов тел, а также реологическими свойствами последнего
Полужидкостная смазка	Смазка, при которой трение и износ между поверхностями, находящимися в относительном движении, определяются свойствами поверхностей и свойствами смазочного материала, отличными от объемных
Циркуляционное смазывание	Смазка, при которой частично осуществляется жидкостная смазка
Одноразовое проточное смазывание	Смазывание, при котором смазочный материал после прохождения по поверхностям трения вновь подводится к ним механическим способом
Одноразовое проточное смазывание	Смазывание, при котором смазочный материал периодически или непрерывно подводится к поверхности трения и не возвращается в систему смазки
Ресурсное смазывание	Одноразовое смазывание на ресурс узла перед началом работы
Смазывание под давлением	Смазывание, при котором смазочный материал подводится к поверхности трения под давлением
Смазывание погружением	Смазывание, при котором поверхность трения полностью или частично, постоянно или периодически погружена в емкость с жидким смазочным материалом
Смазывание кольцом	Смазывание, при котором смазочный материал подводится к поверхностям трения кольцом, увлекаемым во вращение валом.
Капельное смазывание	Смазывание, при котором к поверхности трения подводится жидкий смазочный материал в виде капель
Смазывание масляным туманом	Смазывание, при котором смазочный материал подводится к поверхности трения в виде легкого или густого тумана, обычно образуемого путем введения смазочного материала в струю воздуха или газа
Смазывание	Смазывание, при котором на поверхности

твердым покрытием	трения до работы детали наносится смазочный материал в виде твердого покрытия
Базовое масло	Смазочное масло, к которому добавляется одна или несколько присадок с целью получения готового продукта
Пластичный смазочный материал	Полутвердый или твердый продукт, состоящий из смеси минерального или синтетического масла, стабилизированного мылами или другими загустителями с возможным содержанием других компонентов.
Минеральный смазочный материал	Смазочный материал минерального происхождения, полученный смешением углеводородов в естественном состоянии или полученный в результате обработки минеральных продуктов
Нефтяной смазочный материал	Очищенное масло, полученное на основе нефтяного сырья
Присадка к смазочному материалу	Вещество, добавляемое к смазочному материалу для придания ему новых свойств или изменения существующих
Связующее твердого смазочного материала	Вещество, способствующее сцеплению частиц твердого смазочного материала между собой и поверхностью трения
Антикоррозионная присадка	Присадка, препятствующая, ограничивающая или задерживающая коррозию смазываемых металлических поверхностей
Антиокислительная присадка	Присадка, препятствующая, ограничивающая или задерживающая окисление смазочного материала
Противоизносная присадка	Присадка, препятствующая развитию изнашивания или снижающая интенсивность изнашивания трущихся поверхностей
Противозадирная присадка	Присадка, препятствующая, ограничивающая или задерживающая заедание трущихся поверхностей
Депрессорная присадка	Присадка, понижающая температуру застывания жидкого смазочного материала
Присадка, улучшающая индекс вязкости	Присадка, обычно полимер, понижающая степень изменения вязкости с изменением температуры и увеличивающая в связи с этим индекс вязкости масла
Противопенная присадка	Присадка, уменьшающая или препятствующая образованию стойкой пены в жидком смазочном материале
Моющая присадка	Поверхностно-активное вещество, помога-

	ющее удерживать твердые частицы в масле во взвешенном состоянии
Диспергирующая присадка	Присадка к жидкому смазочному материалу, повышающая дисперсность нерастворимых загрязнений и стабильность суспензий преимущественно при низких температурах
Многофункциональная присадка	Присадка, улучшающая одновременно несколько свойств смазочного материала
Композиция присадок	Смесь нескольких присадок, готовых к добавлению в смазочный материал
Совместимость смазочных материалов	Способность двух или нескольких смазочных материалов смешиваться между собой без ухудшения их эксплуатационных свойств и стабильности при хранении
Консистенция смазочного материала	Свойство пластичных смазочных материалов оказывать сопротивление деформации при внешнем воздействии
Индекс вязкости	Безразмерная величина, характеризующая по стандартной шкале понижение вязкости масла при повышении температуры.
Совместимость при трении	Свойство материалов, сопряженных поверхностей предотвращать схватывание при трении
Способность к поглощению твердых частиц	Свойство материала способствовать поглощению твердых частиц, чтобы уменьшить их царапающее или режущее действие
Прирабатываемость	Свойство подшипникового материала уменьшать силу трения, температуру и интенсивность изнашивания в процессе приработки.
Износостойкость материала	Свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения
Относительная износостойкость	Свойство материалов, характеризуемое отношением интенсивности изнашивания одного материала к интенсивности изнашивания другого при их изнашивании в одинаковых условиях.
Шаржируемость	Способность поверхности детали закреплять на себе попавшие в сопряжение абразивные частицы. Она зависит от физико-механических свойств, микрогеометрии поверхностей трения, смазок и т.д.

КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ ТРЕНИЯ, ИЗНАШИВАНИЯ, СМАЗКИ,
МЕТОДОВ СМАЗЫВАНИЯ И СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Виды трения

Виды трения по наличию относительного движения	Трение покоя; трение движения
Виды трения по характеру относительного движения	Трение скольжения; трение качения
Виды трения по наличию смазочного материала	Трение без смазочного материала; трение со смазочным материалом

Виды изнашивания

Виды механического изнаши- вания	Абразивное изнашивание Гидроабразивное (газоабразивное) изнашивание Эрозионное изнашивание Гидроэрозионное (газоэрозионное) изнашивание Кавитационное изнашивание Усталостное изнашивание Изнашивание при фреттинге Изнашивание при заедании
Виды коррозионно- механического изнашивания	Окислительное изнашивание Изнашивание при фреттинг- коррозии
Виды изнашивания при дей- ствии электрического тока	Электроэрозионное изнашивание

Виды смазки

Виды смазки при различном физическом состоянии смазоч- ного материала	Газовая смазка Жидкостная смазка Твердая смазка
Виды смазки по типу разде- ления поверхностей трения смазочным слоем	Гидродинамическая смазка Гидростатическая смазка Газодинамическая смазка Газостатическая смазка

Эласто-гидродинамическая
смазка
Граничная смазка
Полужидкостная смазка

Методы смазывания

Методы смазывания по периодичности смазывания	Непрерывное смазывание Периодическое смазывание
Методы смазывания по повторности использования смазочного материала	Циркуляционное смазывание Ресурсное смазывание Одноразовое проточное смазывание
Методы смазывания по способу подачи смазочного материала к поверхности трения	Смазывание под давлением Смазывание погружением Капельное смазывание Смазывание масляным туманом Смазывание набивкой

Смазочные материалы

Виды материалов по физическому состоянию	Газообразный смазочный материал Жидкий смазочный материал Пластичный смазочный материал Твердый смазочный материал
Виды материалов по наличию присадок	Базовое масло Смазочный материал с присадкой
Виды материалов по происхождению	Минеральный смазочный материал Нефтяной смазочный материал Растительный смазочный материал Животный смазочный материал Синтетический смазочный материал

ГРЕЧЕСКИЙ АЛФАВИТ

Большая буква	Малая буква	Название	Большая буква	Малая буква	Название
Α	α	Альфа	Ν	ν	Ню
Β	β	Бета	Ξ	ξ	Кси
Γ	γ	Гамма	Ο	ο	Омикрон
Δ	δ	Дельта	Π	π	Пи
Ε	ε	Эпсилон	Ρ	ρ	Ро
Ζ	ζ	Дзета	Σ	σ	Сигма
Η	η	Эта	Τ	τ	Тау
Θ	θ	Тета	Υ	υ	Ипсилон
Ι	ι	Иота	Φ	φ	Фи
Κ	κ	Каппа	Χ	χ	Хи
Λ	λ	Лямбда	Ψ	ψ	Пси
Μ	μ	Мю	Ω	ω	Омега

ДЕВЯТЬ ПРАВИЛ ЭФФЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТРИБОТЕХНИКЕ.

1. Каждое новое изделие, процесс или услуга начинают устаревать в тот день, когда они впервые достигли самоокупаемости.
2. Тот факт, что именно Вы признаете свое изделие, процесс или услугу устаревшими – единственный путь помешать сделать это Вашему конкуренту.
3. Лучше забыть уместное в XX веке различие между «фундаментальными» и «прикладными» исследованиями. Оно все еще может сохраняться в университете, но в промышленности это бессмысленно.
4. Эффективное исследование требует, чтобы руководитель проекта знал, как, когда и какого специалиста надо привлечь. (Руководитель НАСА Джим Уэб успешно высадивший человека на луну был не ученым, а юристом-бухгалтером).
5. Исследования это не одно усилие, а три: усовершенствование, управляемая эволюция и нововведение. Они дополняют друг друга, но значительно отличаются друг от друга.
6. Надо ставить высокие цели! Мелкие исправления обычно также трудно вносить, и встречают они такое же упорное сопротивление, как фундаментальные.
7. Необходимо обязательно делать ретроспективный анализ.
8. Исследование это отдельная работа, но это не отдельная функция. И производство, маркетинг и обслуживание влияют на исследование с самого начала.
9. Исследования надо измерять также, как все остальные показатели и анализировать их. Инновационную активность можно считать как комплексную систему показателей научной деятельности.

ПЕРЕВОД ВНЕСИСТЕМНЫХ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЙ

1 год	= 365,2422 дней
1 инч (дюйм)	= 25,4 мм
1 инч ²	= 6,45 см ²
1 инч ³	= 16,387 см ³
1 фут	= 12 дюймов = 0,3048 м
1 фут ²	= 0,093 м ²
1 ярд	= 3 фута = 0,9144 м
1 ярд ²	= 0,836 м ²
1 миля	= 5280 фута = 1,61 км
1 унция	= 28,35 грамма
1 унция	= 33,3 грана
1 гран	= 0,0648 грамм
1 карат	= 0,2 грамма
1 стоун	= 6,35 кг
1 фунт	= 16 унций = 0,45 кг
1 фунт на кв. дюйм	= 0.0703 кг/см ²
1 тонна (британская)	= 1016 кг = 1,016 метрическая тонна
1 пинта	= 0,568 метра
1 галлон	= 8 пинт = 4,55 литра
⁰ С	= К + 273,15
¹ С	= 33,8 F
1К	= -457,87 F
1 мм ртутного столба	= 133,32 Н/м ²
1 атмосфера	= 760 мм ртутного столба
1 узел	= 0.5148 м/с = 1.8532 км/час
1 эрг	= 1.0198 · 10 ⁻⁸ кгм = 10 ⁻¹⁰ кДж
1 кДж	= 2.777 · 10 ⁻⁴ кВт-часов
1 кВт-час	= 3.6005 · 10 ⁸ кДж
Тройская унция	= 480 гран
1 карат	= 200 миллиграмм
1 баррель	= 159 л.
1/12 фунта	= 480 гран = 24 скрупула = 8 драхм
1PSI	= 6,895 кПА
1000PSI	= 70 кг/см ²

Десятичные приставки в размерностях

Тера ра 2	Гига га 9	Мега его 6	Кило риа 3	Гекто 10 ²	Деци ка 1	Деци ци 1	Санти нти 10 ⁻²	Милли 10 ⁻³
Микро кро 6	Нано но 9	Пико ко 12						

Приложение №6

СЛОВАРИК ПО МОБИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

- GPS** - Global Positioning System (система глобального позиционирования)
- радиосистема определения местоположения, использующая навигационные спутники. Приемники GPS позволяют пользователям в любых условиях определять свои географические координаты, высоту, скорость и время.
- SMS** - Short Message Service (служба коротких сообщений) - система отсылки и приема коротких сообщений в сотовой сети, которая дает возможность владельцам сотовых телефонов обмениваться текстовыми и буквенно-цифровыми сообщениями.
- MMS** - Multimedia Message Service (служба, мультимедийных сообщений).
С помощью MMS можно отправлять картинки, мелодии, фотографии на мобильный телефон или электронную почту.
- SIM** - Subscriber Identity Module (модель идентификации клиента) - карта
- кусочек пластика со встроенным микропроцессором, на который записаны данные, однозначно идентифицирующие номер абонента сотовой сети GSM - стандарта
- USB** - Universal Serial Bus (универсальная серийная шина) - тип соединения, поддерживаемый всеми современными персональными компьютерами.
USB - обеспечивает возможность соединения с компьютером любых периферийных устройств (принтер, мышь, цифровая камера и т.д.)

Дополнительная литература, касающаяся конструирования и работы узлов трения машин.

1. Аниканов С.Г. Оптимизация параметров установки для очистки рабочих жидкостей в условиях эксплуатации строительных машин: Автореф. дис. кан. тех. наук. – Ленинград: ЛИСИ, 1980. – 22 с.
2. Аннакулова Г.К., Лебедев О.В. Chaotic and stochastic movement in self-oscillatory system Вестник ТашГТУ №2, 2005, с. 78-87
3. Аннакулова Г.К., Лебедев О.В., С.Ш., Насретдинова, О.М., Пономарева. Обоснование параметров устойчивости гидропривода с мембранным распределительным устройством. Материалы Международной научно-практической конференции «Инфотекстиль -2005. Внедрение информационно-коммуникационных технологий в текстильную и легкую промышленности»
4. Аннакулова Г.К., Лебедев О.В., Мирзаева З.Ж. Анализ колебаний кузова автомобиля с амортизатором. Вестник ТГТУ № 3, Ташкент 2005
5. Аннакулова Г.К., Лебедев О.В., Мирзаева З.Ж. Об устойчивости кузова автомобиля вблизи положения равновесия. Проблемы механики № 3, Ташкент 2005
6. Аннакулова Г.К., Лебедев О.В., Иноятходжаев Ж.И. Возможности улучшения характеристик амортизаторов колесных машин за счет применения электрореологических рабочих жидкостей. Материалы международной конференции «Проблемы механики и сейсродинамики», Ташкент, АН РУз, 2006, с.537-540
7. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3-х т. – 5-е изд. перераб и доп. М., Машиностроение, 1978. Т.1., 1978, 728 с., Т.2, 1978-559 с., Т.3 – 557 с.
8. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. М., Наука, 1989.
9. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. М., «Наука», 1975. 638 с.
10. Бабицкий В.И. Теория виброударных систем. М., Наука. – 1978. -4
11. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов строительно – дорожных машин. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.
12. Барабанов А.Т. Методы исследования систем с переменными коэффициентами // Методы исследования нелинейных систем автоматического управления / Под ред. Р.А. Нелепина. М.: Наука, 1975. С. 305-443
13. Баутин Н.Н. Поведение динамических систем вблизи границ области устойчивости. М., Наука, 1984 – 172 с.

14. Башков Г.К. и др. Рекомендации по разработке и внедрению системы управления качеством эксплуатации строительных машин. /УНИИОМТП. – М.: Стройиздат, 1987. – 49 с.
15. Беккер М.Г. Введение в теорию системы местность – машина. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
16. Белецкий Б.Ф. Строительные машины и оборудование. Справочное пособие. – Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. / Пер. с англ. – М, Мир, 1983 – 312 с.
17. Богословский С.В., Богословский В.С. Динамика нестационарных систем с равномерно изменяющимися во времени коэффициентами Научное приборостроение. 2002. Т. 12, № 3. С. 83-92.
18. Богоявленский О. Н. Новые интегрируемые случаи уравнений Эйлера // Прикл. математика и механика. 1985. Т. 49, вып. 1. С. 3-9.
19. Болтыков В.П., Филатов А.И. и др. Гидравлический экскаватор ЭО – 5124.
20. Бурдун Г.Д., Маликов Б.Н. Основы метрологии. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 336 с.
21. Вайскранц В.М. Повышение эффективности использования машин для землеройных работ в условиях жаркого климата. – М.: Стройиздат, 1983. – 82 с.
22. Вайскранц М.А. Особенности эксплуатации землеройных машин в средней Азии. – Фрунзе: Кыргызстан, 1973. – 161 с.
23. Ванцевич В.В., Высоцкий М.С., Гилелес Л.Х. Мобильные транспортные машины: взаимодействие со средой функционирования. Мн., 1998
24. Васильев А.С., Дальский А.М., Клименко С.А. и др. Технологические основы управления качеством машин. М., 2003
25. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. – М.: Машиностроение, 1971. – 360 с.
26. Вильсон А.Д. Энтропийные методы моделирования сложных систем. – М.: 1978.
27. Волков Д.П., Крикун В.Я. Строительные машины. – М.: Ассоциация строительных вузов, 2002. – 375 с.
28. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. М.: Мир, 1984, т.1,2 – 350 с.
29. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л., Энергоатомиздат, 1990
30. Губинский А.И., Кобзев В.В. Оценка надежности деятельности человека – оператора в системах управления. М., 1975
31. Даскалов А. Върху влиянието на селскостопанската машина на динамичната устойчивост на трактора с рощу пректуране. – Селскостопанска техника, 1971, 9, №2.
32. Домбровский Н.Г., Гальперин М.И. Строительные машины. – М.: Высшая школа, 1985. - 216 с.
33. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.; Наука, 1980.
34. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1949.

35. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. М., Наука, 1980
36. Заплетохин В.А. Конструирование деталей, механических устройств. Справочник, Л., Машиностроение, Ленингр. отделение, 1990, 669 с.
37. Заславский Г.М., Чирков Б.В. Стохастическая неустойчивость нелинейных колебаний. - // УФН, 1971, т. 105, и. 1, с. 3-21
38. Зеленин А.И., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. – М.: Машиностроение, 1975. – 424 с.
39. Измерения в промышленности: справочник. Пер. с нем. /под ред. П. Профоса. М., Металлургия, 1980, 648 с.
40. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические и мехатронные системы. Ростов-на-Дону.: Изд. Феникс, 2006-320 с.
41. Карасев Г.Н. Техничко – экономическая оценка конструкции строительных экскаваторов // Ж. строительные и дорожные машины. – 1997.- № 4. – С. 11-15.
42. Кожевников С.Н. Теория механизмов и машин. М., Машиностроение, 1969, - 584 с.
43. Колегаев Р.Н. Методические основы экономической оценки долговечности и надежности машин: Автореф. дис. ... док. экон. наук. – М.: 1971. – 38 с.
44. Кочина Н. Н. О периодических решениях задачи об одномерном неустановившемся движении жидкости в трубе // Прикл. математика и механика. 1993. Т. 57, вып. 3. С. 185-190.
45. Крившин А.П. Повышение надежности и долговечности дорожных машин. – М.: Транспорт, 1966. – 187 с.
46. Кульсеитов А.Ж. Управление надежностью гидропривода одноковшовых экскаваторов на основе оптимизации текущего ремонта: Автореф. дис. ... кан. тех. наук. – Алматы: 2001. – 25 с.
47. Курош А.Г. Курс высшей алгебры. М., Наука, 1962, - 408 с.
48. Лавренчик В.Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов. М., Энергоатомиздат, 1986, 272 с.
49. Л.Г. Лобас, В.Г. Вербицкий. Качественные и аналитические методы в динамике колесных машин. Киев, Наук думка, 1990 – 232 с.
50. Лебедев О.В. Разработка гидроусилителя рулевого управления трактора хлопковой модификации. Ташкент, Фан, 1976
51. Лебедев О.В., Абзалов П.Н. Повышение работоспособности тракторных гидроприводов. Ташкент, Фан, 1991, - 120 с.
52. Лебедев О. В., Аннакулова Г.К, Мирзаева З.Ж., А.А.Шермухамедов, Ш.С.Насретдинова. Странные аттракторы в автоколебательных системах колесных машин Материалы Международной научно-практической конференции «Повышение эксплуатационной эффективности транспортных,строительно-дорожных машин и коммуникаций в горных условиях Кыргызстана».Бишкек. Изд. Илим, 2004 С 39-44
53. Лебедев О. В., Аннакулова Г.К, Мирзаева З.Ж., А.А.Шермухамедов, Ш.С.Насретдинова. Приложение теории особенностей к контактным

- задачам. Сборник докладов Республиканской научно-технической конференции по современным проблемам механики. Ташкент, АН РУз, 7-8 октября 2004 г. с. 55-57
54. Лебедев О.В., Моисеенко Ю.Ю.. Перемежаемости и странные аттракторы в динамике жесткого колеса. Сборник докладов Республиканской научно-технической конференции по современным проблемам механики. Ташкент, АН РУз, 7-8 октября 2004 г. с. 109-111
55. Лебедев О.В., Моисеенко Ю.Ю., Мухитдинов А.А., Хашимов А.Д. Методы решения задач устойчивости колесной машины. Сборник научных трудов Республиканской научно-практической конференции «Перспективы развития автомобильно-дорожного комплекса в Республике Узбекистан». Ташкент, изд. ТАДИ, 2004, с. 97-108
56. Лебедев О.В., Моисеенко Ю.Ю. Постановка задачи стабилизации хаотического движения колесной машины. Вестник КГУСТА, Бишкек, вып. 1 (7), 2005 с. 15-18
57. Лебедев О.В. Мухитдинов А.А. Теория движения колесной машины Ташкент, изд ТАДИ, 2004 г., 100с.
58. Лебедев О.В., Матмаурадов Ф.М., Туланов И.О. Теория, расчет и особенности специализированных тракторов. Т., «ФАН», 2005, с. 161
59. Лебедев О.В., Иноятходжаев Ж.Ш. Подвески легковых автомобилей (теория и расчет методом имитационного моделирования). Т., «Фан», 2006, с. 201
60. Лебедев О.В., Р.Т.Салимджанов, Ш.И.Хикматов Основы надежности машин. Т., изд. ТАДИ, 2006
61. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973.
62. Львов П.Н. Износостойкость деталей строительных и дорожных машин. - М.: Стройиздат, 1970, с.71
63. МакКаллоу У. С., Питтс В. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности // Нейрокомпьютер.—1992.—№ 3, 4.—С. 40—53.
64. Мартин Дж. Математическая теория энтропии. – М.: 1989.
65. Машиностроительный гидропривод. Под ред. Прокофьева В.Н. М., Машиностроение, 1978г. – 495 с.
66. Минский М., Пайперт С. Перцептроны.—М.: Мир, 1971.
67. Методические указания по определению экономической эффективности новой техники, технологии, изобретений в отраслях строительного, дорожного и коммунального машиностроения. – М.: Экономика, 1977. – 160 с.
68. Мозберг Р.К. Материаловедение. М., Высшая школа, 1991, 447 с.
69. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений.: Пер. с нем. – М.: Мир, 1990
70. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания М., «Наука», 1987
71. Неймарк Ю.И., Фуфаев Н.А. Динамика неголономных систем. М.: Наука, 1967.
72. Нейронные сети в мехатронике 103

73. Пономарева. О.М., Лебедев О.В. Проектирование и эксплуатация систем приводов автотранспортных средств Вестник КГУСТА, Бишкек, вып. 1 (7), 2005 с.13-15
74. Пономарева О.М. Разработка гидрораспределителей с плоскими мембранами для управления рабочими органами строительных и дорожных машин. Кандидатская диссертация. Бишкек. КГУСТА, 2000
75. Пономарева О.М. О сроке службы гидропривода строительного-дорожного машины. Материалы международной научно-технической конференции «Современные проблемы и перспективы механики», Ташкент. АН РУз, 2006 г.
76. Пономарева О.М., Моисеенко Ю.Ю. Методы решения задач устойчивости привода строительного-дорожного машины. Материалы международной конференции «Проблемы механики и сейсродинамики», Ташкент, АН РУз, 2006, с.608-610
77. Пономарева О.М., Суханова С.В. Расчет параметров щековых дробилок. Методические указания к лаб. работе по «Строительным машинам и оборудованию». Бишкек, 2002 г
78. Пономарева О.М., Джылкчиев А.И. Расчет основных параметров загрузочного механизма прессов для производства строительных изделий Материалы международной научно-практической конференции «Повышение эффективных показателей транспортных, строительного-дорожного машины и коммуникации в условиях высокогорья и жаркого климата». – КГУСТА, Бишкек, 2003 г.
79. Пономарева О.М., Аманкулова А.Т. Методика расчета и выбора посадок для гладких цилиндрических соединений
80. Методическое указание к курсовой работе по «Метрологии, стандартизации и сертификации». Бишкек, 2003г.
81. Пономарева О.М. Эксплуатационная надежность гидравлических тормозных систем автомобилей в условиях высокогорья международной научно-практической конференции «Повышение эффективных показателей транспортных, строительного-дорожного машины и коммуникации в горных условиях Кыргызстана». – Институт Машиноведения, КГУСТА, Бишкек, 2004 г.
82. Пономарева О.М., Дручинин А.К., Шатманов О.Т Податливость систем приводов роботов и манипуляторов Сборник научных трудов республиканской научно-практической конференции «Перспективы развития автомобильного-дорожного комплекса в Республике Узбекистан». Т, ТАДИ, 2004
83. Пономарева О.М., Лебедев О.В. Проектирование и эксплуатация систем приводов автотранспортных средств Вестник КГУСТА. Выпуск 1(7). Бишкек, 2005г, с.13-15
84. Пономарева О.М., Фролов И.О., Раджапова Н.А., Пархоменко Ю.Ф.. Компьютерные технологии в прикладных задачах подъемно-транспортных и строительного-дорожного машины. Учебное пособие. КГУСТА, Бишкек, 2005 г., с.118

85. Пономарева О.М., Лебедев О.В., Хакимзянов Р.Р., Хашимов А.Д. Application of finite element method to design car body. Материалы республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». Т., ТашИИТ, 2005, с. 342-346
86. Пономарева О.М., Лебедев О.В. Анализ исследований по абразивному изнашиванию деталей транспортных машин. Материалы республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». Т., ТашИИТ, 2005, с. 277-283
87. Пономарева О.М., Лебедев О.В., Хакимзянов Р.Р., Хашимов А.Д. Application of finite element method to design car body small class. Материалы международной конференции «ICSCCW-2005» Анталия (Турция)
88. Пономарева О.М. Приложение теории гладких функций к решению задач устойчивости систем гидроприводов строительно-дорожных машин Сборник материалов республиканской научно-технической конференции «Интеграция образования, науки и производства в автомобильно-дорожном комплексе». Т., 2005, 1 том, с.145-148
89. Пономарева О.М., Валько М.В. Системный подход в схеме моделирования поведения водителя автотранспортного средства Сборник материалов республиканской научно-технической конференции «Интеграция образования, науки и производства в автомобильно-дорожном комплексе». Т., 2005, 1 том, с.119-122
90. Пономарева О.М., Хван Н.В. Математическое моделирование проницаемости мембран Узбекский химический журнал №6 2005, с. 41-44
91. Пономарева О.М., Хван Н.В. Исследование изменений фильтрации по длине мембраны из композиционного материала
92. Узбекский журнал «Композиционные материалы». № 1 2006., с. 46-47
93. Пономарева О.М., Аннакулова Г.К., Моисеенко Ю.Ю. Обеспечение устойчивости систем приводов колесных машин. Научное издание «Монография». Т. «Фан», 2006. с. 257
94. Пономарева О.М., Моисеенко Ю.Ю., Лебедев О.В. Терминология, используемая в инженерных задачах устойчивости машин. Т., изд-во ТАДИ, 2007 с. 31
95. Пономарева О.М., Валько М.В., Молдалиев Э. Некоторые аспекты психофизиологии в надежности водителя автотранспортного средства. Материалы международной научно-технической конференции «Современные проблемы и перспективы механики». Ташкент, ИМСС АН РУз, 2006, с. 502-505
96. Пономарева О.М. О сроке службы гидропривода строительно-дорожной машины Материалы международной научно-технической конференции «Современные проблемы и перспективы механики». Ташкент, ИМСС АН РУз, 2006, с. 505-508

97. Пономарева О.М., Моисеенко Ю.Ю. Методы решения задачи устойчивости привода колесных строительного-дорожных машин. Материалы международной научно-технической конференции «Современные проблемы и перспективы механики». Ташкент, ИМСС АН РУз, 2006, с. 608-610
98. Пономарева О.М., Хван Н.В. Очистка пор фильтропатронов. Заявка на изобретение № IAP 20060147 от 02.05.2006
99. Пономарева О.М., Турсунова Г.Х., Лебедев О.В. Особенности эксплуатации и производства радиальных пневматических шин
100. Узбекский журнал «Проблемы механики» №4, 2006
101. Пономарева О.М., Лебедев О.В., Калманбетова А.Ш. Устойчивость режимов в гидроприводах колесных машин. Ж. «Наука и новые технологии». №1. 2006. Бишкек, с.51-52
102. Пономарева О.М., Хромов С.А. Методика научного прогнозирования и устойчивость систем Журнал «Промышленный транспорт Казахстана». №_, 2006, стр.
103. Пономарева О.М. Влияние интенсивности теплового потока на процесс торможения колесной машины. Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Безопасность движения поездов». М., МИИТ, 2006, стр
104. Пономарева О.М. Процессы, происходящие в поверхностных слоях деталей гидропривода машин. Материалы четвертой международной научно-практической конференции «Транспорт Евразии XXI века». Алматы, 2006, стр.
105. Пономарева О.М., Иноятходжаев Ж.Ш., Лебедев О.В., Аннакулова Г.К. Амортизатор транспортного средства. Патент РУз FAP 00257. Оpubл. в бюлл. изобр. 29.12.2006. Расмий ахборотнома, № 6, 2006 с. 88-89
106. Пономарева О.М., Хромова Г.А. Решение задачи активного гашения автоколебаний в исполнительных механизмах гидроприводов строительного-дорожных машин с плоскими мембранами. Материалы республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» Ташкент, изд-во ТашИИТ, 2006г., с. 3-7
107. Пономарева О.М., Юткина И.С. О форме абразивных частиц и механизме изнашивания деталей транспортных машин
108. Материалы республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» Ташкент, изд-во ТашИИТ, 2006г., с. 21-25
109. Пономарева О.М., Халмухамедов А.С., Лебедев О.В. Оценка работоспособности узлов гидропривода ААМН по изменениям энтропии. Труды Академии Вооруженных Сил Республики Узбекистан, Ташкент, 2006 г., вып. 4, с.15-22
110. Пономарева О.М., Халмухамедов А.С., Лебедев О.В. Динамическая стабилизация параметров ААМН. Труды Академии Вооруженных Сил Республики Узбекистан, Ташкент, 2006 г., вып. 4, с.22-29

111. Пономарева О.М., Халмухамедов А.С., Лебедев О.В. Методы улучшения динамических качеств систем приводов ААМН. Труды Академии Вооруженных Сил. Республики Узбекистан, Ташкент, 2006 г., вып.4, с. 12-14
112. Пономарева О.М., Халмухамедов А.С., Лебедев О.В. О моделировании нагружения шины. Труды Академии Вооруженных Сил. Республики Узбекистан, Ташкент, 2006 г., вып.4, с. 5-11
113. Пономарева О.М., Юлдашева Г.Б., Шарифходжаева Х.А. Износостойкость мартенситных образцов деталей гидроприводов строительно-дорожных машин. Материалы республиканской научно-практической конференции «Современные технологии в автомобильно-дорожном комплексе», Ташкент, изд-во ТАДИ, 2006г., с.190...192
114. Пономарева О.М., Аннакулова Г.К., Моисеенко Ю.Ю. О хаотических колебаниях в гидросистеме управления колесной машины. Материалы республиканской научно-практической конференции «Современные технологии в автомобильно-дорожном комплексе», Ташкент, изд-во ТАДИ, 2006г., с. 155...158
115. Пономарева О.М., Мухитдинов А.А., Салимов У.З., Лебедев О.В. Влияние интенсивности теплового потока на процесс торможения автомобиля. Научно-технический журнал Ферганского политехнического института, № 1, 2007, с. 31-36
116. Пономарева О.М., Валько М.В. Системный подход в схеме моделирования поведения водителя автотранспортного средства Бишкек. Вестник Кыргызского отделения международной Академии энергетики имени А.Эйнштейна № 2 (4), 2006, с. 54-56
117. Пономарева О.М., Лебедев О.В., Матмуратов Ф.М. Влияние трения на изнашивающую способность деталей. Материалы юбилейной научно-практической конференции Авиакосмического факультета ТГАИ, 2006, с. 59-62
118. Пономарева О.М., Лебедев О.В., Матмуратов Ф.М. Устойчивость показателей рабочей жидкости в гидроприводах машин. Материалы юбилейной научно-практической конференции Авиакосмического факультета ТГАИ. Т., 2006, с. 136-138
119. Пономарева О.М., Мухитдинов А.А., Валько М.В. Основные причины аварийности автотранспортных средств. Материалы республиканской научно-практической конференции «Современные технологии в автомобильно-дорожном комплексе», Ташкент, изд-во ТАДИ, 2006г., с.141..146
120. Пономарева О.М., Мухитдинов А.А., Хикматов Ф.Ш. Оценка вероятности нарушения условий безопасного движения автомобиля. Материалы республиканской научно-практической конференции «Современные технологии в автомобильно-дорожном комплексе», Ташкент, изд-во ТАДИ, 2006г., с.147...154
121. Пономарева О.М., Иноятходжаев Ж.Ш., Лебедев О.В. Анализ устойчивости работы амортизаторов с использованием имитационного

- моделирования Материалы республиканской научно-практической конференции «Современные технологии в автомобильно-дорожном комплексе», Ташкент, изд-во ГАДИ, 2006г., с.110...113
122. Пономарева О.М., Иноятходжаев Ж.Ш. Модель оптимального управления деформированием упругой мембраны амортизатором взлетно-посадочного устройства. Материалы республиканской научно-технической и производственной конференции «Проблемы развития авиакосмической отрасли Республики Узбекистан» (19-20 апреля 2007 г) Т., 2007, ч.1, с. 376-379
123. Пономарева О.М., Джылкичиев А.И. Бекбоев А.Р.Обоснование параметров оборудования для жесткого экструзионного формования строительных изделий.Узбекский журнал «Проблемы механики». Т., изд. «Фан», №6, 2007, с.
124. Пономарева О.М., Турсунова Г.Х., Мухитдинов А.А.Влияние скорости движения колесной машины на управляемость. Материалы республиканской научно-технической конференции «Проблемы наземных транспортных систем» Ташкент, ТашИИТ, (17-19 мая), 2007, с.41-43
125. Пономарева О.М., Моисеенко Ю.Ю.Энтропия динамических систем машин. Материалы республиканской научно-технической конференции «Проблемы наземных транспортных систем» Ташкент, ТашИИТ, (17-19 мая), 2007, с.47-52
126. Пономарева О.М.Дистанционное измерение параметров механических колебаний элементов конструкции колесных машин лазерным доплеровским измерителем вибрации. Материалы республиканской научно-технической конференции «Проблемы наземных транспортных систем» Ташкент, ТашИИТ, (17-19 мая), 2007, с.53-55
127. Пономарева О.М., Юлдашева Г.Б.Моделирование процесса термообработки деталей. Материалы республиканской научно-технической конференции «Проблемы наземных транспортных систем» Ташкент, ТашИИТ, (17-19 мая), 2007, с.56-58
128. Пономарева О.М., Матмуратов Ф.М.Исследование процесса изнашивания деталей гидропривода. Материалы республиканской научно-технической конференции «Проблемы наземных транспортных систем» Ташкент, ТашИИТ, (17-19 мая), 2007, с.153-155
129. Пономарева О.М., Аннакулова Г.К., Лебедев О.В., Моисеенко Ю.Ю.Анализ высокочастотных колебаний колесной машины. Материалы международной научно-технической конференции по современным проблемам механики. Самарканд 2007, книга 5 «Теория машин и механизмов» с. 45-51
130. Пономарева О.М., Аннакулова Г.К., Баезов Р.Р.Тенденция развития конструкций бензонасосов ДВС. Материалы республиканской научно-практической конференции «Интеграции науки и производства в агроинженерии» Ташкент, изд. ТГАУ, 2007, с. 118-121

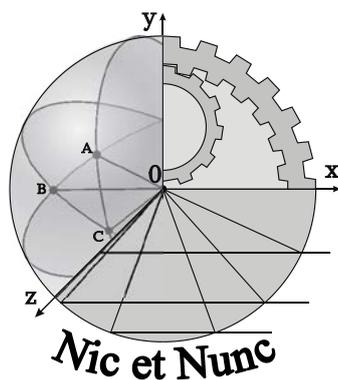
131. Пономарева О.М., Лебедев О.В., Мухитдинов А.А. Мехатронная концепция проектирования колесных машин. Узбекский журнал «Проблемы механики» № 4, 2007, с. 18-22
132. Пономарева О.М., Джылкычиев А.И.
133. Предпосылки к проектированию рабочего места оператора строительной дорожной машины. Ж. «Наука. Техника. Технология». Мат-лы I-й Международной конференции инж. акад. Кырг. Респ. Сборник научных трудов. Бишкек, 2007, с.185
134. Пономарева О.М. Изменение технического состояния гидронасосов СДМ в процессе эксплуатации Ж. «Наука. Техника. Технология». Мат-лы I-й Международной конференции инж. акад. Кырг. Респ. Сборник научных трудов. Бишкек, 2007, с.190
135. Пономарева О.М., Лебедев О.В., Аннакулова Г.К., Моисеенко Ю.Ю. Взаимосвязь между устойчивостью систем и приращением энтропии. Материалы Международной научно-практической конференции “Innovation – 2007”. Ташкент. Изд. «Yangi asr avlodi», 2007, с. 335-336
136. Пономарева О.М., Мухитдинов А.А. Обеспечение устойчивости функциональных движений мехатронных систем приводов колесной машины. Материалы Международной научно-практической конференции проблемы развития автотранспорта и транспортных коммуникаций в Центрально – Азиатском регионе. Ташкент, изд. ТАДИ, том I, 2007, с. 94-96
137. Пономарева О.М., Каниев Д.М. Первичная волна давления в жидкости после срабатывания мембранного клапана установленного на трубопроводе. Материалы Международной научно-практической конференции проблемы развития автотранспорта и транспортных коммуникаций в Центрально – Азиатском регионе. Ташкент, изд. ТАДИ, том I, 2007, с. 79-82
138. Пономарева О.М., Юлдашева Г.Б., Шарифходжаева Х.А. О прочности валов гидронасоса с мартенситной структурой. Материалы Международной научно-практической конференции проблемы развития автотранспорта и транспортных коммуникаций в Центрально – Азиатском регионе. Ташкент, изд. ТАДИ, том I, 2007, с.122-123
139. Пономарева О.М., Аблаев И.Ш. Обоснование выбора методов сравнительного анализа системы поддержки принятия решения (СППР). Научно-технический и производственный журнал «Горный вестник Узбекистана» № 3 (30) 2007, стр. 85-87
140. Попов Е.П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. – М; Наука, 1973.
141. Проектирование датчиков для измерения механических величин./ под ред. Е.П. Осадчего. М., Машиностроение, 1979 – 480 с.
142. Райс Дж., Бир Ф., О распределении разностей двух последовательных экстремальных значений непрерывного случайного процесса. Труды ASME/Серия Д.Т.2, 1965

143. Рейш А.К. Повышение износостойкости строительных и дорожных машин. – М.: Машиностроение, 1986. – 181 с.
144. Рекомендации по эргономической оценке строительных и дорожных машин. – М.: Стройиздат, ВНИПИ труда в строительстве, 1987. – 87 с.
145. Ротенберг Г.В. Теория подвески автомобиля. М.: Изд. Машиностроительной литературы. 1951, - 210 с.
146. Савин И.Ф. Гидравлический привод строительных машин. М., Стройиздат, 1974, 240 с
147. Садыков Показатели остаточной долговечности и их оценка в задачах продления сроков эксплуатации технических объектов. – М., Знание, 1986 – 106с..
148. Салимджанов Р.Т., Лебедев О.В., Хикматов Ш.И. Основы надежности машин. Т., ТАДИ, 2005, 102 стр
149. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М., Наука, 1977
150. Справочник по инженерной психологии / Борисов С.В. Денисов В.Н., Душков Б.А. и др./- М., Машиностроение, 1982
151. Справочник по инженерной психологии. /под ред. Б.Ф.Ломова/. М., 1982
152. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие./под ред. Р.А. Макарова. М., Машиностроение, 1975 – 288 с.
153. Теория подобия и размерностей. Моделирование. / Алабушев П.М., Геронимус В.Б., Минкевич Л.М. и др. – М., Высшая школа, 1968
154. Технология машиностроения: в 2-х томах. Т.1. Основы технологии машинстроения. М., изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998- 564 с. Т.2. Производство машин. М., изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998 – 640 с.
155. Тургумбаев Ж.Ж., Фролов И.О. Надежность и эффективность эксплуатации автотранспортных и строительных машин в условиях высокогорья. Учебное пособие. – Бишкек: КГУСТА, 1999. – 80 с.
156. Тургумбаев Ж.Ж., Недорезов И.А., Фролов И.О. Оценка эффективности эксплуатации строительно – дорожных машин // Ж.механизация строительства. – М.: -2001.- № 1. – С. 22-23.
157. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Кн.3. Исполнительные устройства и сервомеханизмы. Под ред. В.В. Солодовникова. М., Машиностроение, 1976, - 736 с.
158. Федоров Д.И., Бондарович Б.А. Надежность рабочего оборудования землеройных машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 280 с.
159. Федосов Е.А., Инсаров В.В., Сливохин О.С. Системы управления конечным положением в условиях противодействия среды. М.: Наука, 1989. 272 с.
160. Фролов И.О., Пономарева О.М. Повышение эффективности эксплуатации строительных машин в условиях высокогорья и жаркого климата. – Бишкек: Издат. дом «Кыргызстан», 2001. – 130 с.

161. Фролов И.О., Пономарева О.М. Повышение надежности гидрораспределителей горных и строительных машин // Ж.наука и новые технологии. – Бишкек. – 2002. - № 4. – С. 70-73.
162. Фролов И.О., Пономарева О.М. Особенности получения и характеристики карбонитрида и кубического нитрида бора. Вестник КГУСТА. Труды международной научно-практической конференции «Повышение эксплуатационной эффективности транспортных, строительно-дорожных машин и коммуникаций в горных условиях Кыргызстана». Бишкек, Выпуск 2(12), 2006 с. 139-141
163. Фролов И.О., Пономарева О.М. Упрочнение рабочих поверхностей деталей машин. Вестник КГУСТА. Труды международной научно-практической конференции «Повышение эксплуатационной эффективности транспортных, строительно-дорожных машин и коммуникаций в горных условиях Кыргызстана». Бишкек, Выпуск 2(12), 2006 с. 141-143
164. Уилкинсон У. Неньютоновские жидкости. М.: Мир, 1964
165. Уиттекер Е.Т. Аналитическая динамика. М.-Л., 1937, ОНТИ, с. 500
166. Хакен Г. Синергетика. М., 1980
167. Хашимов А.Д., Турсунов И.С., Хашимов Д.И Математическая модель управляемости автомобиля при маневрах типа «переставка». – «Автомобильная промышленность», 2003, № 8, с. 8-9
168. Хеллан К. Введение в механику разрушения. М.. Мир, 1988
169. Шейнин А.М., Крившин Б.И. и др. Эксплуатация дорожных машин. – М.: Машиностроение, 1980. – 327 с.
170. Шейнин А.М. Закономерности влияния надежности машин на эффективность их эксплуатации. – М.: Знание, 1987. – 54 с.
171. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б.С. Касаткин, А.Б. Лобанов и др./ Киев: наук. Думка, 1981 -583 с.
172. Dowell E.H. Non-linear oscillations of a fluttering plate. – AIAA.J., 1966, 4, p. 1267 [Ракетная техника и космонавтика. – М.: Мир, 1966, №7, с.149.].
173. В.В.Mandelbrot Fractal Geometry of Nature, San Francisco: Freeman, 1982
174. Kohonen T. Self-Organization and Associative Memory.—Berlin: Springer, 1987.
175. Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition.
176. Vol. 1 / Rumelhart D. E., McClelland J. L., eds.—Cambridge: MIT Press, 1986
177. Widrow B., Hoff M. E. Adaptive switching circuits // 1960 IRE WESCON Convention Record. Part 4.—New York: IRE, 1960.—P. 96—104.
178. Kitching K.J, Cole D.J // ASME Journal of Dynamic System Measurement and Control, September 2000 Vol. 122. № 3 p. 498-506
179. Sorge K., Wilhelm H Integration of a Damper Control Algorithm into a ADAMS / Car Full Vehicle Model, 16-th European Mechanical Dynamics User Conference, Berchtesgaden, 14-15. 11. 2001

180. The automatic transmission systems for heavy trucks / ZF Tech. information, Sheet – No. 1328 757 101 b, ZF Friedrichshafen AG, 2001, Germany.
181. ISO Technical Committee TC 22/SC9, “Vehicle dynamics and road-holding ability-vocabulary”, in ISO 8855, 1991
182. SAE, “Vehicle aerodynamics terminology,” in SAE Standard G 1594, 1991
183. Bakker, E, Nyborg, L, and Pacejka, H.B. :”Tyre modeling for use in vehicle dynamics studies”, in SAE Technical Paper 870421, 1987
184. Inagaki S., Kshiro I and Yarnarnoto M. “Analysis on vehicle stability in critical cornering using phaseplane method”, ISAE Review, vol. 16, pp. 287-292, April 1994
185. ISO Technical committee TC 22/SC9, “Lateral transient response test methods”, in ISO 7401,2003
186. ISO Technical committee TC 22/SC9, “ Steady-state circular driving behaviour”, in ISO 4138, 2004
187. ISO Technical committee TC 22/SC9, “Braking in a turn”, in ISO 7975, 2006
188. Karnopp D. Vehicle stability. Marcel Dekker, Inc., 270 Madison Avenue, New York, N Y10016, USA : CRC Press , 2004
189. Matsuno K, Le Grand, and Michael E, “Method and system for road surface friction coefficient estimation”, in United State Patent 2007150156, 2007
190. Pacejka, H.B. Tire and Vehicle Dynamics. SAE, 2nd ed, 2005
191. Shen S, Wang J, Shi P, and Premier G “Nonlinear dynamics and stability analysis of Vehicle plane motions”, Vehicle System Dynamics, vol. 45, pp. 15-35, Jan. 2007
192. Uffelmann F “Automotive stability and handling dynamics in cornering and braking manuevers”, Vehicle System Dynamics, vol. 12 pp.203-223, 1983
193. Van Winsum, W. and Godthelp H “Speed choice and steering behavior in curse driving”, Human Factors, vol. 38 no. 3 pp434-441, 1996

д.т.н., профессор Лебедев Олег Владимирович
к.т.н., доцент Пономарева Ольга Максимовна



триботехника

Отпечатано ЧП «Ризаев М.Х.»
Подписано к печати 2010 г.
Тираж 100 экз. формат 21 × 30 ½
Ташкент ул.Амира Тимура, 20
Тел. 233 – 13 - 07

ISBN 978-
5-217-03463-6

