

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Хидиров Аббос Муродиллоевич

«Проектирование оборудования для термической обработки
в вакууме. Разработка технологического процесса вакуумно-
термической обработки материалов»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на получение степени магистра

по специальности 5А520803 – Технология производства
летательных аппаратов

Научный руководитель: к.ф-м.н., доц. А.И.Камардин

Ташкент – 2012 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

	Введение.....	
1.	Анализ информации по патентной и научно- технической литературе в области обработки металлов и сплавов, режущих инструментов с использованием вакуумно-термических процессов	
2.	Вакуумная термическая обработка быстрорежущих сталей.....	
2.1.	Быстрорежущие стали.....	
2.2.	Влияние легирующих элементов на свойства стали.....	
2.3.	Термическая обработка быстрорежущих сталей.....	
2.4.	Вакуумная термическая обработка материалов.....	
2.4.1.	Вакуумная термическая обработка быстрорежущих сталей.....	
2.4.2.	Вакуумные электропечи.....	
2.4.3.	Способ вакуумной термической обработки мелкогабаритного инструмента из быстрорежущей стали.....	
2.4.4.	Устройство для термической обработки материалов в вакууме.....	
3.	Термодинамическое моделирование вакуумно-термической обработки быстрорежущих сталей.....	
3.1.	Моделирование фазовых превращений быстрорежущих сталей при вакуумно-термической обработке.....	
4.	Расчет вакуумной установки для термической обработки материалов....	
4.1.	Расчет узлов установки вакуумной обработки.....	
4.2.	Расчеты параметров рабочей камеры установки и процессов газовыделения при термической обработке изделий.....	
4.3.	Вакуумный пост установки.....	
4.4.	Электрическая схема установки и расчет нагревателя.....	
4.4.1.	Оценка нагрева стали в вакууме в зависимости от удельной мощности..	
4.4.2.	Тормозная способность вещества и пробег ускоренных электронов.....	
4.4.3.	Закономерности поглощения ускоренных электронов материалами.....	
4.4.4.	Эмиссия.....	
5.	Фазовые превращения в быстрорежущих сталях Р18 и Р6М5К5 при вакуумно-термической обработке.....	
	Выводы.....	
	Литература.....	

Глава I.

1. Анализ информации по патентной и научно-технической литературе в области обработки металлов и сплавов, режущих инструментов с использованием вакуумно-термических процессов.

Разработкой вакуумных печей занимается фирма SECO-WARWICK Ltd.- печи с цилиндрической или прямоугольной вакуумной нагревательной камерой, характеризующиеся относительно высокой скоростью охлаждения обрабатываемых материалов за счет потока азота повышенного давления .

Они отличаются сравнительно большими массогабаритными параметрами, большим расходом энергии для нагрева обрабатываемых материалов, кроме того для охлаждения материалов используют поток газа, запускаемого в камеру с обрабатываемыми материалами (изделиями). Основной причиной, препятствующей эффективному нагреву и охлаждению материалов, является плохая теплопередача от нагревателя (нагретых стенок) к материалу и охлаждение потоком газа с низкой теплоемкостью, что не позволяет провести быстрый нагрев и охлаждение материалов. Известно, что в развитии технологии термической обработки в вакууме основное значение имеет скорость охлаждения материалов.

Наиболее известные производители вакуумных печей в Европе немецкая фирма «ALD» и польская фирма «SEKO/WARWICK» производят горизонтальные, вертикальные вакуумные печи, печи с вращающимся подом во время цикла охлаждения. Диффузионный насос NH35 в печах с вращающимся подом позволяет работать с рабочим вакуумом $2 \cdot 10$ мбар.

Вакуумные печи SWL с круглой нагревательной камерой и нагревательными элементами из изогнутого графита, со вспомогательным оборудованием оборудованием конвекционного нагрева ConFlap в настоящее время являются авангардом конструкций вакуумных печей.

Компания «SCHMETZ» (Германия), разрабатывает и производит оборудование для осуществления термообработки в условиях вакуума. Представленное оборудование способно удовлетворить запросы и потребности

каждого заказчика, потому как каждая модель изготавливается с учётом особых требований и условий производства технологического цикла.

Особенности оборудования:

Конвекционный нагрев в защитной газовой среде - обеспечивает точное и ровное распределение температуры по всему объёму садки. Рекомендуется для обработки садки с соблюдением высокой точности геометрических параметров деталей.

Система двухстороннего вертикального или горизонтального (радиального или осевого) охлаждения - обеспечивает равномерное охлаждение садки при условии изменения направления подачи газа. Позволяет практически устранить возникновение поволок.

Система обработки холодом - интегрированная система обработки садки при температурах «ниже нуля» вплоть до -185°C . Рекомендуется при обработке деталей с учётом дальнейшей эксплуатации в особых условиях: в энергетической, авиационной и космической промышленности).

Система ускоренного охлаждения садки - заключается в обеспечении оборудования дополнительной камерой, что в свою очередь обеспечивает высокую скорость охлаждения. Рекомендуется при обработке деталей с заданной структурой или с особыми механическими требованиями к ним).

Система многонаправленного (радиального/осевого) охлаждения садки - применение данной системы позволяет осуществлять равномерное охлаждение садки, со сложной геометрией, в печах с вертикальной загрузкой садки.

Система управлением технологическим процессом - представляет собой интегрированную систему, позволяющую осуществлять следующее:

- программировать циклы обработки -архивировать программы
- осуществлять обработку садки в автоматическом и ручных режимах - отображать на дисплее: ведение технологического цикла, состояние основных узлов оборудование

- оповещать оператора о неисправностях и аварийных ситуациях.

Диапазон рабочих температур при нагреве - от 200°C до 1600°C .

Диапазон рабочего вакуума - от 1×10^{-1} до 1×10^{-7} мбар.

Давление охлаждающего газа - 0,9; 2; 6; 10 и выше бар

Фирма TAV изготавливает промышленные печи для различных технологических процессов обработки изделий в вакууме и в газовой среде, под давлением до 10 бар.



FastJet – тип горизонтальный. $T_{\max} = 1400^{\circ}\text{C}$

Параметры	Тип					
	TF	TNF	TRF	TRNF		
Макс.вакуум	10^{-3} mbar	10^{-5} mbar	10^{-3} mbar	10^{-5} mbar		
Газ нагрева Макс.давление	1 bar	1 bar	1,5 bar	1,5 bar		
Газ охлаждения Максимальное давление	1 bar	1 bar	6...10 bar	6...10 bar		
Модель	Размеры рабочего пространства, мм			Рабочий объем дм ³	Загрузка кг	Мощность кВт
	высота	ширина	глубина			
40/40/60	400	400	600	96	300	80/120
60/60/90	600	600	900	324	600	150/220
80/80/120	800	800	1200	768	800	200/300
100/100/150	1000	1000	1500	1500	1500	275/410

Рис. 1.2. Печь вакуумный и конвекционный нагрев с закалкой под давлением газа и отпуска

- Максимальная температура до 1400°C
- Вес садки от 300 до 1500 кг
- Размеры садки от 400/400/600 до 1000/1000/1500 мм
- Максимальный вакуум 10^{-3} и 10^{-6} mbar (в зависимости от модели)
- Максимальное давление газа при нагреве - 1,5 бар
- Максимальное давление газа при охлаждении - 10 бар

Особенности данного типа печей:

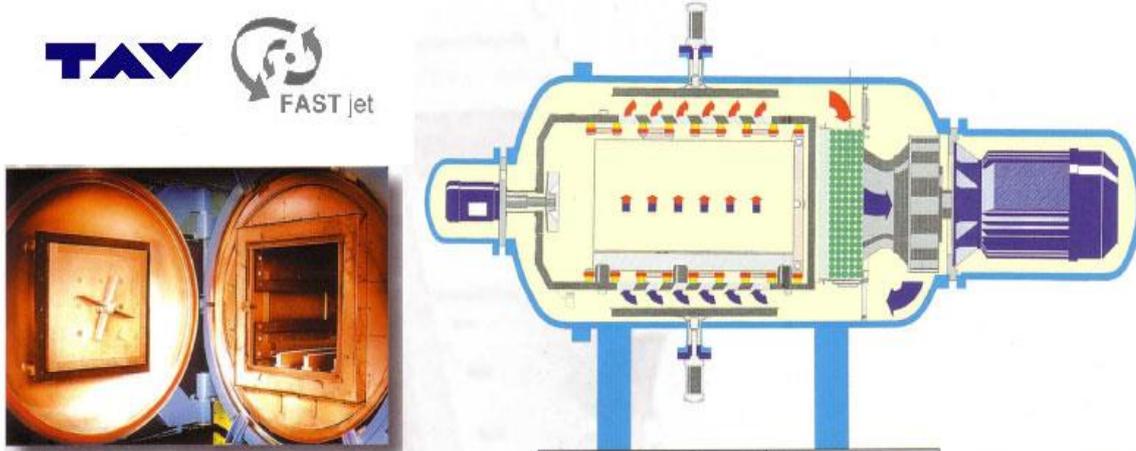


Рис. 1.3. Печь вакуумный и конвекционный нагрев с закалкой под давлением (рабочая схема)

Конвекционный нагрев с помощью высокопроизводительной газонагревательной турбины и высокоэффективная закалка при охлаждении под высоким давлением благодаря распределенному потоку газа.

Достоинства:

- Равномерный гомогенный нагрев даже при пониженных температурах
- Сокращение времени цикла обработки
- Улучшенная эксплуатация установки
- Закалка и отпуск проводятся в одном цикле без дополнительной перегрузки садки.



CartJet – тип горизонтальный. $T_{max} = 1400^{\circ}C$

Параметры	Тип			
	T/C	TN/C	TP/C	TRN/C
Макс.вакуум	10^{-3} mbar	10^{-6} mbar	10^{-3} mbar	10^{-6} mbar
Газ охлаждения	1 bar	1 bar	6...10 bar	6...10 bar
Максимальное давление	1 bar	1 bar	6...10 bar	6...10 bar

Модель	Размеры рабочего пространства, мм			Рабочий объем литр	Загрузка кг	Мощность кВт
	высота	ширина	глубина			
1000	1000	1000	1000	1000	1000	264...330
1200	1200	1200	1200	1728	1500	354...450
1500	1500	1500	1500	3375	2500	420...540
1800	1800	1800	1800	5832	3500	600...780

Рис. 1.4. Промышленные вакуумные печи с выдвигаемым подом

- Максимальная температура до $1400^{\circ}C$
- Вес садки от 1000 до 3500 кг
- Размеры садки от 1000/1000/1000 до 1800/1800/1800 мм
- Максимальный вакуум 10^{-3} и 10^{-6} mbar (в зависимости от модели)
- Максимальное давление газа при охлаждении - 10 бар

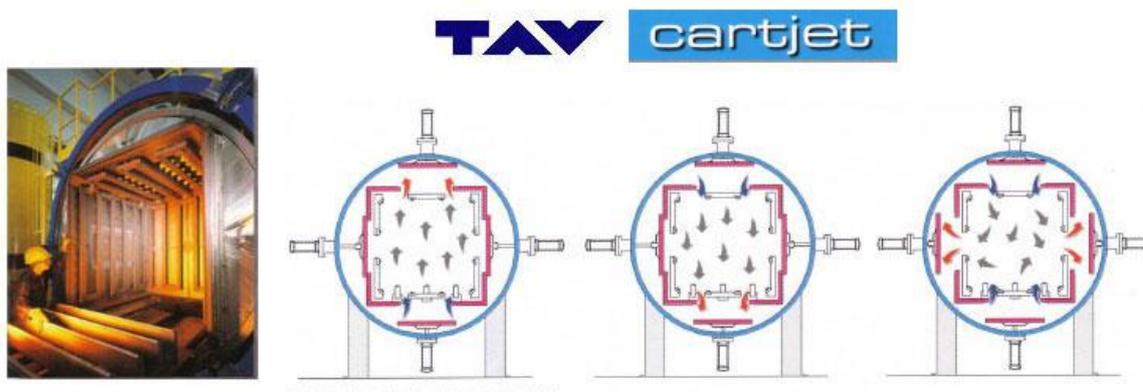


Рис. 1.5. Промышленные вакуумные печи с выдвигаемым подом (рабочая схема)

Применение:

- Закалка и отпуск

- Выравнивающий, очищающий отжиги
- Отжиг для снятия напряжений, гомогенизация.
- Пайка
- Особенности процессы
- Обработка под высоким вакуумом деталей турбин

Достоинства:

- Полная автоматизация
- Повторяемость циклов обработки
- Высокая скорость охлаждения
- Высокая равномерность температуры на фазе нагрева
- Минимальная необходимость в обслуживании
- Легкость в эксплуатации и безопасность
- Надежность и экономичность
- Упрощенная загрузка деталей

Серия SINTVAC. Промышленные печи для изготовления маленьких деталей сложной формы по технологиям MIM (Metal Injection Moulding) и PIM (Powder Injection Moulding)



Рис. 1.6. Промышленные печи для изготовления маленьких деталей сложной формы по технологиям MIM

- Максимальная температура 1400 °С
- Вес садки от 50 до 800 кг
- Размеры садки от 250/250/400 до 800/800/1200 мм
- Максимальный вакуум 10⁻³ и 10⁻⁶ мбар (в зависимости от модели)

Технологические преимущества:

- Использование технологий MIM (Metal Injection Moulding) или PIM (Powder Injection Moulding) позволяет серийно изготавливать высококачественные детали как из различных сталей (конструкционных, нержавеющей, инструментальных), других металлов (никелевых сплавов, титана), сплавов с низким коэффициентом расширения типа Ковар, магнитных сплавов, новых композиционных материалов, включающих алюминий, керамику, Cu-W и др. без механического резания и с меньшими затратами по сравнению с точным литьем по выплавляемым моделям .

- Оптимизация конструкции детали. MIM процесс снимает практически все ограничения по сложности формы изготавливаемой детали. Все что было принципиально невозможно реализовать из-за ограничений механической обработки теперь доступно. Конструкторы и дизайнеры получили возможность ставить на первое место при проектировании функциональные приоритеты, а не возможности традиционных технологических процессов.

- Увеличение прочности детали. При прочих равных условиях, если до этого применялась литейная заготовка, MIM процесс позволит получать более прочные детали за счет модификации характеристик материалов.

- Возможность получения практически любой поверхности. Дополнительные возможности по закалке и покрытиям. MIM процесс позволяет придавать поверхностям формируемых деталей практически любые свойства - от очень гладких до текстурированных.

- Точность допусков и размеров. Использование MIM технологии позволяет получать детали с минимальной толщиной сечения от 0,2 до 10 мм с шероховатостью поверхности 0,4 - 1,6 μm и плоскостностью 0,3 %.

- Экономия материала. Производство по MIM технологии характеризуется максимально экономным расходом материала. В традиционных методах металлообработки до 80% материала может уйти в стружку, а в MIM процессе литники после дробилки могут повторно использоваться. Эта экономия становится еще более значимой при работе с дорогими металлами.

- Сокращение затрат на дорогостоящие фрезы, расходные материалы, сервис станков и т.д.

- Сокращение технологического цикла производства.

Области применения:

Оборона, аэрокосмическая промышленность, медицина, опто-волоконная и кино-фото техника, распылительные насадки, режущие и мерительные инструменты, системы безопасности

Серия LIFTJET. Вертикальные вакуумные печи для равномерной и максимально длительной термообработки и высокотемпературной пайки длинномерных изделий (авиационная и атомная промышленность).



LiftJet – тип вертикальный. $T_{\max} = 1350^{\circ}\text{C}$

Параметры	Тип		
	TH/SE	TP/SE	TRH/SE
Макс.вакуум	10^{-3} mbar	10^{-3} mbar	10^{-6} mbar
Газ охлаждения	1 bar	6 bar	6 bar
Максимальное давление	1 bar	6 bar	6 bar

Модель	Размеры рабочего пространства, мм		Рабочий объем дм ³	Загрузка кг	Мощность кВт
	высота	ширина			
90/90	900	1000	527	900	264...330
120/120	1200	1200	1356	1200	354...450
150/150	1500	1500	2650	1500	420...540
180/180	1800	1800	4578	1800	600...779
200/200	2000	2000	6280	3000	600...780

Рис. 1.7. Вертикальные вакуумные печи для равномерной и максимально длительной термообработки и высокотемпературной пайки длинномерных изделий

- Максимальная температура до 1350°C
- Вес садки от 900 до 3000 кг
- Диаметр садки от 900 до 2000 мм
- Высота от 1000 до 2000 мм
- Максимальный вакуум 10^{-3} и 10^{-6} мбар (в зависимости от модели)
- Максимальное давление газа при охлаждении - 6 бар

Для загрузки деталей используется тележка – лифт.

Достоинства:

- Очень удобный доступ к загрузке и обслуживанию
- Высокая скорость охлаждения
- Абсолютная повторяемость результатов обработки
- Высокая температурная равномерность

Серия DUALJET. Горизонтальные однокамерные высоковакуумные печи для закалки, отпуска, отжига, а также всех других видов термической обработки сталей



Рис. 1.8. Горизонтальные однокамерные высоковакуумные печи для закалки, отпуска, отжига, а также всех других видов термической обработки сталей и сплавов

- Максимальная температура до 1400 °С
- Вес садки от 25 до 3000 кг
- Размеры садки от 200/200/300 до 1500/1500/2000 мм
- Максимальный вакуум 10⁻³ и 10⁻⁶ mbar (в зависимости от модели)
- Максимальное давление газа при охлаждении - 10 бар

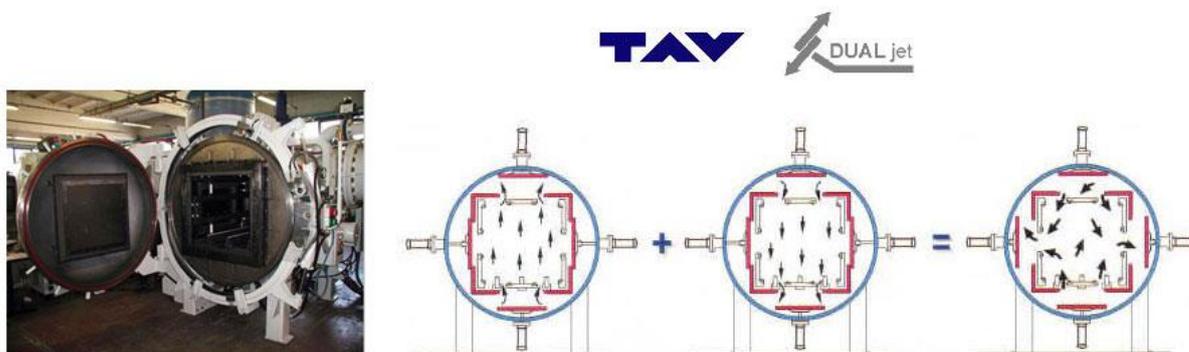


Рис. 1.9. Горизонтальные однокамерные высоковакуумные печи для закалки, отпуска, отжига, а также всех других видов термической обработки сталей и сплавов

Применение:

- Закалка и отпуск
- Выравнивающий, очищающий отжиги
- Отжиг для снятия напряжений, гомогенизация.
- Пайка

- Особенности процессы
- Обработка под высоким вакуумом деталей турбин

Достоинства:

- Полная автоматизация
- Повторяемость циклов обработки
- Высокая скорость охлаждения
- Высокая равномерность температуры на фазах нагрева и охлаждения
- Минимальная необходимость в обслуживании
- Легкость в эксплуатации и безопасность
- Надежность и экономичность

Глава II.

2. Вакуумная термическая обработка быстрорежущих сталей

2.1. Быстрорежущие стали

Стали для режущего инструмента должны обладать высокой твердостью, превышающей твердость обрабатываемого материала. В процессе работы режущая часть инструмента все время находится в соприкосновении со снимаемой

стружкой, т.е. происходит непрерывное трение и износ поверхности режущей кромки инструмента.

2.1.1. Теплостойкая быстрорежущая сталь



Рис. 2.1. Фреза концевая быстрорежущая с цилиндрическим хвостовиком, с износостойким покрытием

Быстрорежущие стали применяют для режущих инструментов, работающих в условиях значительного нагружения и нагрева рабочих кромок. Инструмент из быстрорежущих сталей обладает высокой стабильностью свойств. Они обозначаются в соответствии с ГОСТ 19265 и содержат 0,7-1,5% С, поставляются высококачественными. Они маркируются P18, P6M5 и др. В марках стали буквы и цифры обозначают Р – быстрорежущая (от англ. слова “Rapid” – быстрый, скорый), цифра, следующая за буквой – среднюю массовую долю вольфрама, М – молибден, Ф – ванадий, К – кобальт, А – азот; цифры, следующие за буквами, означают соответственно массовую долю молибдена, ванадия, кобальта; Ш – электрошлаковый переплав. В обозначении марок стали не указывают массовую долю: хрома – при любой массовой доле, молибдена – до 1 % включительно, ванадия – в стали марок P18, P6M5, P9K5, P6M5K5, P9M4K8 и P2AM9K5. Быстрорежущие стали сочетают высокую теплостойкость (600-650 °С в зависимости от состава и обработки) с высокими твердостью до 68–79 HRC, износостойкостью при повышенных температурах и повышенным сопротивлением пластической деформации. Для обеспечения красностойкости сталь легируют большим количеством вольфрама в сочетании с молибденом и ванадием. Кроме этих элементов все быстрорежущие стали легированы хромом, а некоторые кобальтом. Применяемые быстрорежущие стали делят на три группы: стали нормальной производительности, повышенной и высокой производительности. Стали нормальной производительности характеризуются пониженной теплостойкостью (615–620 °С). К ним относятся: вольфрамовые стали (P9, P12,

P18), вольфрамомолибденовые (P6M5, P6M3, P8M3 и др.), безвольфрамовые (9X6M3Ф3АГСТ, 9X4M3Ф2АГСТ и др.). Сталь P6M5 в основном вытеснила стали P18, P12 и P9 и нашла применение при обработке цветных сплавов, чугунов, углеродистых и легированных сталей, а также некоторых теплоустойчивых и коррозионно-стойких сталей. Разработаны новые марки безвольфрамовых быстрорежущих сталей нормальной производительности – 9X6M3Ф3АГСТ (ЭК-41) и 9X4M3Ф2АГСТ (ЭК-42). Эти стали имеют меньшую плотность, что сокращает расход быстрорежущих сталей на 4-5 %. По режущим свойствам они соответствуют свойствам стали P6M5, что и предопределяет область их применения. Стали повышенной производительности дополнительно легированы кобальтом и ванадием. К ним относятся стали с повышенной теплостойкостью 625-640 °С: вольфрамокобальтовые (P9Ф5, P9K10 и др.); вольфрамованадиевые (P9Ф5, P12Ф3 и др.), вольфрамованадиевые с кобальтом (P10Ф5K5, P12Ф4K5 и др.); вольфрамованадиевые с кобальтом и молибденом (P12Ф3K10M3, P12Ф2K5M3 и др.). К группе быстрорежущих сталей повышенной производительности следует отнести и быстрорежущие дисперсионно-твердеющие сплавы с интерметаллидным упрочнением. Наибольшее распространение получил сплав В11М7К23 (ЭП831). Быстрорежущие стали относятся к ледебуритному (карбидному) классу.

Сталь P18 закаливают с температуры 1270–1290 °С, а P6M5 – с 1210–1230 °С. Высокие температуры закалки необходимы для более полного растворения вторичных карбидов и получения при нагреве высоколегированного хромом, вольфрамом, молибденом и ванадием аустенита. Это обеспечивает получение после закалки мартенсита, устойчивого против отпуска, т.е. с высокой теплостойкостью. Для быстрорежущих сталей, имеющих много избыточных карбидов, характерно сохранение мелкого зерна, даже при очень высоких температурах закалки. Во избежание образования трещин в инструменте при нагреве до температуры закалки его подогревают. Окончательная термическая обработка – закалка и высокий отпуск. Микроструктура закаленной стали состоит из легированного мартенсита, остаточного аустенита (до 30%) и карбидов (рис. 2.2). После трехкратного отпуска при температуре 560°С количество остаточного аустенита уменьшается до 2–3%, твердость увеличивается (рис. 2.3). Для снижения

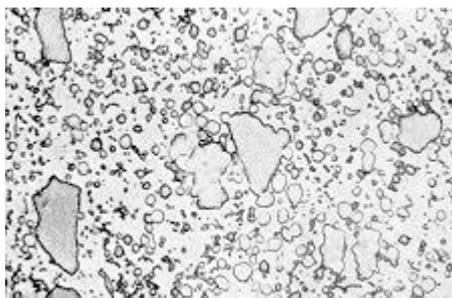


Рис. 2.2. Структура быстрорежущей стали - мелкие, твердые, однородно распределенные карбиды и мартенсит, легированный для теплостойкости вольфрамом и (или) молибденом

количества остаточного аустенита применяется обработка холодом.

Из-за высокой стоимости и дефицитности вольфрама из быстрорежущей стали изготавливают только рабочую часть инструмента, которую прикрепляют к державке из обычной углеродистой стали (табл.2.1).

Таблица 2.1

Примерное назначение и свойства быстрорежущих сталей

Марка стали, прочность, износостойкость, особенности	Назначение
--	------------

стали	
Р18. Удовлетворительная прочность и повышенная шлифуемость, широкий интервал закалочных температур	Для всех видов инструментов, особенно подвергаемых значительному шлифованию, при обработке конструкционных материалов прочностью до 1000 МПа
Р9. Повышенная износостойкость, более узкий интервал оптимальных закалочных температур, повышенная пластичность при горячей пластической деформации.	Для изготовления инструментов простой формы, не требующих большого объема шлифования, применяемых для обработки конструкционных материалов
Р6М5. Повышенная прочность, более узкий интервал закалочных температур, повышенная склонность к обезуглероживанию. Шлифуемость удовлетворительная.	Для всех видов инструментов при обработке конструкционных материалов прочностью до 1000 МПа.
Р12Ф3. Повышенная износостойкость, удовлетворительная прочность. Шлифуемость пониженная.	Для чистовых инструментов (резцов, зенкеров, разверток, сверл, протяжек и др.) при обработке на средних режимах резания вязких аустенитных сталей, а также материалов, обладающих повышенными режущими свойствами.
Р6М5Ф3. Повышенная износостойкость, удовлетворительная прочность. Шлифуемость пониженная.	Для чистовых и получистовых инструментов (фасонных резцов, разверток, фрез, протяжек и др.) предназначенных для работы на средних скоростях резания, преимущественно обрабатывающих углеродистые и легированные инструментальные стали.
Р9К5, Р6М5К5, Р18К5Ф2. Повышенная вторичная твердость, теплостойкость,	Для изготовления черновых и получистовых инструментов (фрез, долбяков, метчиков, сверл и т.п.), предназначенных для обработки

удовлетворительная прочность и вязкость. Шлифуемость пониженная.

углеродистых и легированных конструкционных сталей на повышенных режимах резания, а также некоторых труднообрабатываемых материалов.

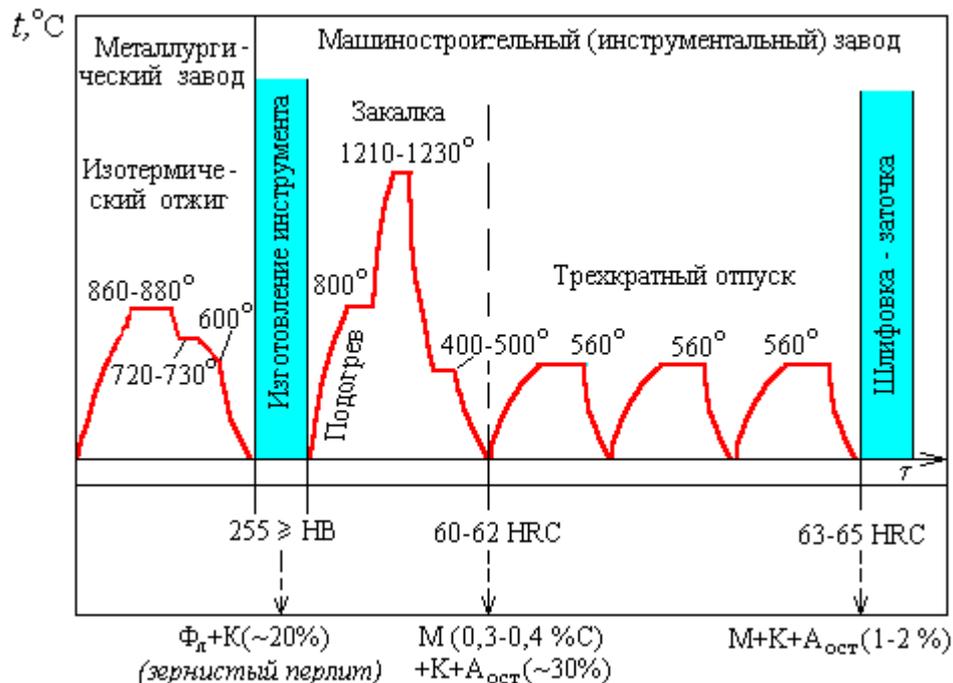


Рис. 2.3. Схема термической обработки быстрорежущей стали Р6М5. Фл-легированный феррит; К-карбид; М-мартенсит; Аост- остаточный аустенит. В скобках показано количество углерода в мартенсите и количество остаточного аустенита в структуре стали, %

Для придания стали теплостойкости инструмент подвергают закалке и многократному отпуску. Высокие температуры закалки необходимы для более полного растворения вторичных карбидов и получения высоколегированного аустенита. Это обеспечивает получение после закалки мартенсита, обладающего высокой устойчивостью против отпуска, т.е. теплостойкостью. Во избежание образования трещин в инструменте при нагреве до температуры закалки его подогревают. Выдержка при температуре закалки должна быть непродолжительной от 8 до 9 с на каждый миллиметр диаметра или наименьшей длины инструмента при нагреве в расплавленной соли (чаще в $BaCl_2$) и 12–14 с при нагреве в печи. Охлаждающей средой при закалке чаще является масло. Для уменьшения деформации инструментов применяют ступенчатую закалку в

расплавленных солях (KNO_3) при 400–500 °С. После закалки следует трехкратный отпуск, вызывающий превращение остаточного аустенита в мартенсит и дисперсное твердение за счет выделения карбидов.

Режущие свойства инструмента, не подвергающегося переточке по всем граням (сверла, развертки, метчики, фрезы), можно повысить азотированием при 550–560 °С.

Сведения о быстрорежущей стали марки P18

Сталь инструментальная быстрорежущая (по ГОСТ 9373-60) предназначена для изготовления металлорежущего инструмента с большим сопротивлением изнашиванию и сохранением механических свойств в условиях повышенной температуры до 600-700°С (таб. 2.2, 2.3.).

Таблица 2.2

Химический состав быстрорежущей стали P18

Химический элемент	%
Ванадий (V)	1.00-1.40
Вольфрам (W)	17.0-18.5
Кобальт (Co), не более	0.50
Кремний (Si), не более	0.50
Марганец (Mn), не более	0.50
Молибден (Mo), не более	1.00
Никель (Ni), не более	0.40
Сера (S), не более	0.03
Углерод (C)	0.73-0.83
Фосфор (P), не более	0.03
Хром (Cr)	3.80-4.40

Таблица 2.3

Механические свойства быстрорежущей стали P18 в зависимости от температуры отпуска

t отпуска, °С	σ_B , МПа	KCU, Дж/м ²	HRC,
Закалка 1280 ⁰ С, масло. Отпуск трёхкратный по 1 ч.			

400	1370	23	61
500	1470	19	63
550	2350	17	66
600	2210		65

Технологические свойства

Температураковки: начала 1200°C, конца 900°C. Охлаждение в колодцах при 750-800 °С.

Свариваемость: при стыковой электросварке со сталью 45 и 40Х хорошая.

Шлифуемость: повышенная (ГОСТ 19265-73).

Таблица 2.4

Температура критических точек

Критическая точка	°С
Ac1	820
Ac3	860
Ar3	770
Ar1	725

Таблица 2.5

Физические свойства

Температура испытания, °С	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Модуль нормальной упругости, Е, ГПа	228	223	219	210	201	192	181			
Модуль упругости при сдвиге кручением G, ГПа	83									
Плотность, ρп, кг/см ³	8800									
Коэффициент теплопроводности Вт/(м*°С)		26	27	28	29	28	27	27		
Уд.	419	472	544	627	718	815	922	1037	1152	1073

Электросопротивление (ρ, Ном*м)										
------------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Таблица 2.6

Красностойкость

Температура, °С	Время, ч	Твердость, HRC ₃
620	4	59

Основные свойства (достоинства и недостатки):

1. Повышенная износостойкость;
2. Узкий интервал закалочных температур;
3. Повышенная пластичность при горячей пластической деформации;
4. Пониженная шлифуемость.

Назначение

Резцы, сверла, фрезы, резьбовые фрезы, долбяки, развертки, зенкеры, метчики, протяжки для обработки конструкционных сталей с прочностью до 1000 МПа, от которых требуется сохранение режущих свойств при нагревании во время работы до 600 °С, заменитель сталь P12.

2.2. Влияние легирующих элементов на свойства стали

Основное свойство быстрорежущих сталей – *высокая теплостойкость*. Она обеспечивается введением большого количества *вольфрама* совместно с другими карбидообразующими элементами: *молибденом, ванадием, хромом*.

W и Mo в присутствии Cr связывают углерод в специальный труднокоагулируемый при отпуске карбид типа Me₆C и задерживают распад мартенсита. Выделение дисперсных карбидов, которое происходит при повышенных температурах отпуска (500-600 °С), вызывает дисперсионное твердение мартенсита (явление вторичной твердости). Особенно эффективно

вторичная твёрдость и теплостойкость повышаются при введении нескольких сильных карбидообразователей, например вольфрама (одного или совместно с молибденом) и ванадия. При отпуске ванадий, выделяясь в виде карбидов, усиливает дисперсионное твердение, а вольфрам (молибден), сохраняясь в мартенсите, задерживает его распад. Добавление ванадия усиливает действие вольфрама и молибдена.

Увеличению теплостойкости способствует также *кобальт*. Он не образует карбидов, но, повышая энергию межатомных сил связи, затрудняет коагуляцию карбидов и увеличивает их дисперсность.

Основное же назначение углерода – повышенная твердость.

В результате комплексного легирования инструменты из быстрорежущих сталей сохраняют высокую твёрдость до 560-640⁰С и допускают в 2-4 раза более производительные режимы резания, чем инструменты из углеродистых и низколегированных сталей.

Основные свойства быстрорежущей стали марки P18 в состоянии поставки (первичная термическая обработка)

Температура ковки: 1200-900 °С

Температура отжига: 840-860 °С

НВ (не более): 255

Массовая доля карбидной фазы: 28%

2.3. Термическая обработка быстрорежущих сталей

Быстрорежущие стали, к которым относится сталь марки P18, - наиболее характерны для режущих инструментов. Они сочетают высокую теплостойкость (600 – 650⁰С в зависимости от состава и обработки) с высокими твердостью (до HRC 68 – 70), износостойкостью при повышенных температурах и повышенным сопротивлением пластической деформации. Высокие режущие свойства быстрорежущих сталей обеспечиваются легированием сильными карбидообразующими элементами (W, Mo, V), элементами, повышающими температуру ($\alpha \rightarrow \gamma$) – превращения (Co, Al), и применением специальной термической обработки, заключающейся в закалке с высоких температур (1200-

1300°С) и в отпуске, вызывающем дисперсионное твердение (первичная термическая обработка).

Подобная термическая обработка приводит к *карбидной неоднородности*. Избыточные карбиды быстрорежущих сталей входят в состав эвтектики, образующейся по границам зерен аустенита и δ -феррита. Литая сталь из-за присутствия эвтектики имеет высокую хрупкость и низкую прочность.

Режимы окончательной термической обработки и свойства быстрорежущей стали марки P18

Температура закалки: 1270-1290 °С

Температура отпуска: 550-570 °С

HRC: 61-65

$\sigma_{и}$: 2600-3000 МПа

Термическая обработка быстрорежущей стали марки P18

Существенное улучшение структуры и прочностных свойств данных сталей достигается в ходе особой термической обработки. Рассмотрим ее на примере быстрорежущей стали марки P18.

Для снижения твердости сталь, прежде всего, *отжигают*. В литом виде она имеет ледебуритную эвтектику, которую устраняют горячей деформацией, путем измельчения первичных карбидов.

Ковка стали – ответственная операция. При недостаточной проковке возникает карбидная ликвация – местное скопление карбидов в виде участков неразрушенной эвтектики. Карбидная ликвация снижает стойкость инструмента и увеличивает его хрупкость. Деформированную сталь для снижения твердости (до 207 – 255 НВ) подвергают изотермическому отжигу. Структура отожженных сталей состоит из сорбитообразного перлита, вторичных и более крупных первичных карбидов. Общее количество карбидов в стали P18 составляет примерно 28%. Основным карбидом стали P18 является сложный карбид вольфрама переменного состава $Fe_3W_3C(Me_6C)$, который растворяет в себе часть ванадия и хрома.

В карбидах содержится 80-95% (W и V) и 50% Cr, остальная часть легирующих элементов растворена в феррите.

Высокие эксплуатационные свойства инструментов из быстрорежущих сталей приобретают после *закалки* и *трехкратного отпуска*. Из-за низкой теплопроводности быстрорежущие стали при закалке нагревают медленно с прогревами при 450 и 850°C, применяя соленые ванны для уменьшения окисления и обезуглероживания. Особенность закалки быстрорежущих сталей – высокая температура нагрева (температура закалки стали P18 1270-1290°C, температура отпуска 550-570°C). Она необходима для обеспечения теплостойкости – получения после закалки высоколегированного мартенсита в результате перехода в раствор максимального количества специальных карбидов.

Степень легирования аустенита (мартенсита) увеличивается с повышением температуры нагрева. При температуре 1300°C достигается предельное насыщение аустенита – в нем растворяется весь хром, около 8%W, 1%V и 0,4-0,5%C.

Легирование аустенита происходит при растворении вторичных карбидов. Первичные карбиды не растворяются и тормозят рост зерна аустенита, поэтому при нагреве, близком к температуре плавления, в быстрорежущих сталях сохраняется мелкое зерно.

Быстрорежущие стали по структуре после нормализации относятся к мартенситному классу. После закалки мелкие инструменты охлаждают на воздухе, крупные - в масле. Сложные по форме инструменты (фрезы и т.д.) для уменьшения деформаций подвергают ступенчатой закалке с выдержкой в горячих средах при 500-550°C.

После закалки не достигается максимальная твердость сталей (60-65HRC), так как в структуре кроме мартенсита и первичных карбидов содержится 30-40% остаточного аустенита, присутствие которого вызвано снижением температуры точки M_k ниже 0 °C. Остаточный аустенит превращают в мартенсит при *отпуске* и *обработке холодом*. Отпуск проводят при температуре 550-570 °C. В процессе выдержки при отпуске из мартенсита и остаточного аустенита выделяются дисперсные карбиды Me_6C . Аустенит, обедняясь углеродом и легирующими элементами, становится менее устойчивым и при охлаждении ниже точки M_n испытывает мартенситное превращение. Однократного отпуска недостаточно для превращения всего остаточного аустенита. Применяют *двух-* и *трехкратный отпуск* с выдержкой по одному часу и охлаждением на воздухе, при этом

количество аустенита значительно снижается. Применение обработки холодом после закалки сокращает цикл термической обработки. В термически обработанном состоянии быстрорежущие стали имеют структуру, состоящую из мартенсита отпуска и карбидов, и твердость HRC 63-65.

Режущие свойства фрезы дополнительно улучшают созданием на неперетачиваемых поверхностях тонкого слоя (10-15 мкм) нитридов или карбонитридов. Такой слой характеризуется высокой твердостью (≥ 1000 HV) и износостойкостью. Его получают газовым или ионным азотированием, которое проводят непродолжительное время (20-30 минут) при температуре, не превышающей температуру отпуска ($470-550^{\circ}\text{C}$). Используют также низкотемпературное цианирование, карбонитрацию, напыление нитридов титана.

2.4. Вакуумная термическая обработка материалов

2.4.1. Вакуумная термическая обработка быстрорежущих сталей

Производством вакуумных печей занимаются различные иностранные компании. Компания SECO/WARWICK с большим успехом на протяжении многих лет производит горизонтальные и вертикальные вакуумные печи, предназначенные для инструментальной, авиационной, энергетической, электронной и других промышленности. Является одним из мировых лидеров в области производства электрических печей. Сегодня компания проектирует и изготавливает печи различных модификаций и поставляет их в более чем 40 стран по всему миру. Для инструментальной промышленности, а также для сервисных центров по термообработке, в области термической обработки изделий из инструментальных сталей, в настоящее время поставляются вакуумные печи для газовой закалки с давлением охлаждающего газа до 10/12 бар. Применение такого рода печей в технологии является стандартом в термической обработке инструментов из сталей для работы в холодном и горячем состояниях, быстрорежущих сталей и т.п. Возможность газовой закалки после газового нагрева или конвекционно/вакуумного нагрева расширяется на всё большее количество технологий. Это связано с развитием производства печей, а также с возрастающими требованиями промышленности.

Печи компании SECO/WARWICK характеризуются компактной конструкцией, легкостью в обслуживании, минимальным расходом электроэнергии и охлаждающего газа, высокой производительностью, а также низкими затратами, связанными с обслуживанием оборудования.

SECO/WARWICK применяет широкие, легкие и эластичные нагревательные элементы из изогнутого графита, расположенные вокруг садки, что позволяет обеспечить (рис. 2.4):

- оптимальное распределение температуры и точность системы;
- вакуумный нагрев садки разной конфигурации,
- плотностью упаковки и со сложным поперечным сечением;
- уменьшение деформации садки;
- быстрый нагрев и охлаждение садки, благодаря минимальной массе нагревательной системы.

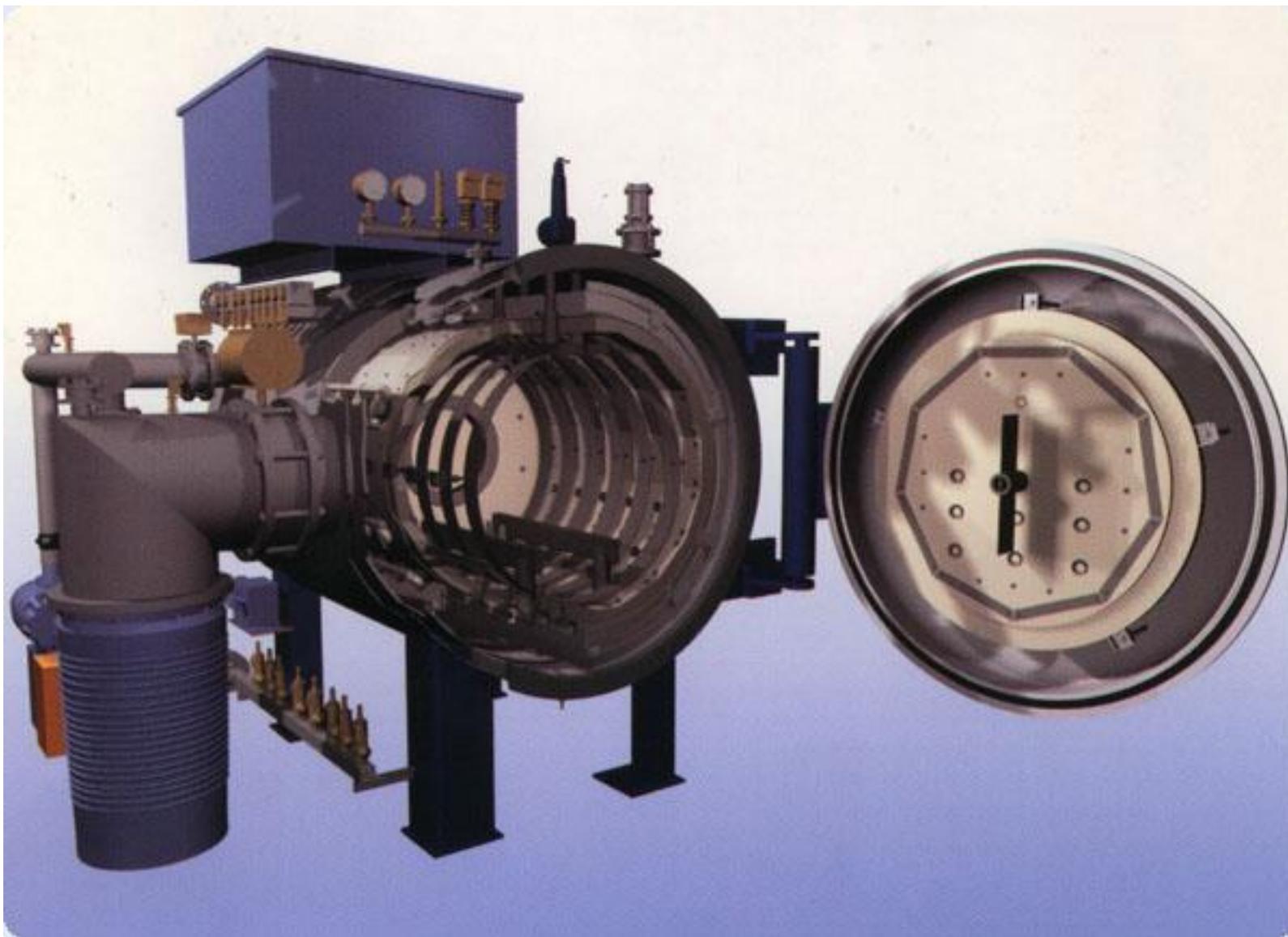


Рис. 2.4. Вакуумная электропечь компании SECO/WARWICK

В качестве отличительной особенности печей конструкции SECO/WARWICK является система охлаждения с профилированными соплами наддува, расположенными вокруг садки и в дверях печи. Газ из горячей зоны удаляется через специальное отверстие в задней стенке. Эта современная система обеспечивает наилучшие параметры скорости и равномерности охлаждения.

В Харьковском физико-техническом институте разработана вакуумная электропечь сопротивления для термической обработки инструмента из быстрорежущей стали.

Запуск нового вакуумно-термического оборудования в производственных условиях требует высоких капиталовложений при покупке и вводе их в эксплуатацию, что является непреодолимым барьером для большинства отечественных предприятий в плане технического перевооружения. Поэтому окупаемость вакуумного термического оборудования в условиях конкретного предприятия является главным критерием при принятии решения о его покупке. Модернизация существующих вакуумных установок один из путей решения существующей проблемы.

Вакуумная электропечь сопротивления СЭВГ–3.3/13–ИЗГ впервые разработана в Специальном конструкторском бюро Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» для термического упрочнения инструментов из быстрорежущих сталей. Она применима в серийном производстве для термической обработки малогабаритных изделий из высоколегированных сталей (быстрорежущих, хромистых коррозионностойких и др.). Для обеспечения полной прокаливаемости малогабаритных изделий (с максимальным диаметром сечения до 100 мм) из высоколегированных сталей (содержание легирующих элементов более 10 мас. %), как показывает практика, достаточно обеспечить охлаждение садки в потоке инертного газа при давлении до 0,17 МПа. Основными параметрами, влияющими на скорость охлаждения садки в потоке инертного газа, являются скорость и однородность распределения потока газа. Первый параметр – газовый поток большой скорости – позволяет значительно увеличить эффективность теплоотвода от садки уже при давлениях газа ниже 0,17 МПа. Второй параметр – однородность распределения газового потока – должен минимизировать температурные градиенты в охлаждаемых изделиях. Данные

технические решения были реализованы в элеваторной вакуумной электропечи сопротивления СЭВГ-3.3/13-ИЗГ, обозначение которой расшифровывается следующим образом: С – нагрев сопротивлением; Э – элеваторная; В – вакуумная; Г – нагревательный модуль на основе углеродных материалов; 3 – диаметр рабочего пространства в дециметрах; 3 – высота рабочего пространства в дециметрах; 13 – номинальная температура в сотнях градусов Цельсия; И – исполнение; З – закалка; Г – охлаждающая среда – газ. Схема конструкции однокамерной вакуумной элеваторной электропечи приведена на рис. 2.5. Равномерный нагрев садки и управление скоростью нагрева обеспечиваются автоматической системой регулирования температуры, а также специальной конструкцией нагревательного модуля из углеродного композиционного материала, который окружает садку со всех сторон (1). Равномерный нагрев садки сводит к минимуму коробление деталей в процессе нагрева. Закалка садки происходит в зоне охлаждения (2) высокоскоростным газовым потоком. Инертный

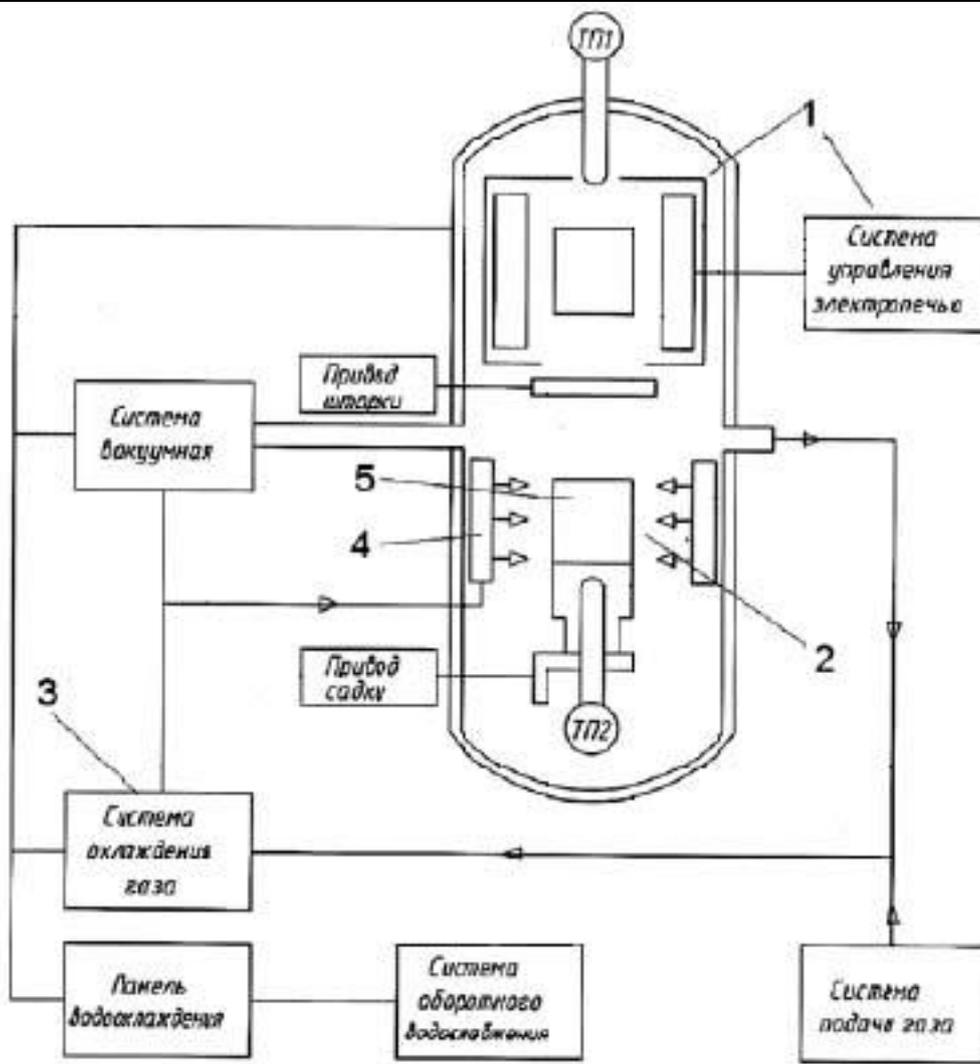


Рис. 2.5. Схема конструкции однокамерной вакуумной элеваторной электропечи

газ (азот) с большой скоростью обдувает садку, обеспечивая эффективный теплоотвод. Охлаждение газа до комнатной температуры происходит на основном теплообменнике (3). Охлажденный газ с помощью мощной газодувки направляется через газовый спрейер (4) на горячую садку (5). Основным конструктивным преимуществом элеваторной электропечи перед ее однокамерными аналогами является разделение нагревательных и охлаждающих зон. Поэтому в данной печи инертным газом охлаждается только сама садка без заметного охлаждения нагревательного модуля. Второе преимущество состоит в дополнительном охлаждении садки за счет теплообмена излучением в диапазоне температур 700-1300°С при ее выведении из зоны нагрева и перемещении в зону охлаждения. Тепловое излучение поглощается водоохлаждаемыми стенками вакуумной камеры. Такая схема теплоотвода в вакуумной электропечи СЭВГ-3.3/13-ИЗГ позволяет достичь скоростей охлаждения заметно выше критических, а конструкцию

электроды заметно упростить. Печи полностью автоматизированы, оборудованы компьютерной системой, позволяющей осуществлять различные программы, в том числе архивацию хода процесса. Вся информация о ходе процесса и состоянии печи отображается на мониторе. Оператор печи имеет в своем распоряжении сведения, которые позволяют полностью контролировать весь цикл термической обработки. Задавая программу, оператор осуществляет весь процесс (нагрев, закалку, двух-трехкратный отпуск) в автоматическом режиме без промежуточного извлечения садки. При необходимости после извлечения садки из печи по окончании цикла термообработки изделия можно сразу же, без дополнительной подготовки поверхности, помещать в установку типа “Булат” для нанесения упрочняющих покрытий. В обеих печах было обеспечено достижение требуемых свойств термообрабатываемых изделий. В первом случае это пуансоны из стали P18 (твердость на контроле - HRCэ 63-64), во втором - различные виды режущего инструмента из стали Р6М5 (твердость на контроле - HRCэ 64-65).

Исследования показали, что термообработка в вакуумной электроде сопротивления СЭВГ-3.3/13-ИЗГ создает соответствующую техническим требованиям микроструктуру, которая обеспечивает высокую износостойкость и режущую способность инструмента. При этом распределение дисперсных карбидов в матрице достаточно однородно, что благоприятствует однородности материала в целом и повышает его эксплуатационную стойкость.

2.4.2. Вакуумные электроды

Электроды являются экологически безопасным оборудованием и предназначены для проведения различных термических процессов (пайки, отжига, дегазации, спекания и т.п.) в вакууме при температуре до 2000 °С. Допускается работа в среде нейтральных газов повышенной чистоты при избыточном давлении не более 0,02 МПа (0,2 кгс/см²). Эти печи могут применяться в атомной, электронной, авиационной и других отраслях промышленности.

Электроды имеют водоохлаждаемый корпус, выполненный из нержавеющей стали. В качестве материалов, используемых в «горячей» зоне, применены молибден и вольфрам. Элементы электродов обеспечивают низкий уровень газоотделения, малую тепловую инерцию. Управление температурным режимом

может осуществляться как с помощью микропроцессорного регулятора температуры, так и в ручном режиме.

В электропечах с нагревательными блоками из тугоплавких металлов не рекомендуется:

а) проводить технологические процессы в углерод содержащих и окислительных атмосферах;

б) нагревать углеграфитовые изделия и другие материалы, активно взаимодействующие с материалами конструкции нагревательной камеры.

Технические характеристики камерных вакуумных электропечей с нагревательными блоками из тугоплавких металлов приведены в таблице 2

Таблица 2.7

Технические характеристики камерных вакуумных электропечей

ПАРАМЕТРЫ	Типы печей			
	СНВЭ-1.3.1/16	СНВЭ-1.3.1/20	СНВЭ-16/16	СНВЭ-9/18
Мощность, кВт (Температура, °С)	20(1600) 15(1400) 13(1300)	27(2000) 21(1800) 16(1600)	35(1600) 28(1400) 24(1300)	29(1800) 22(1600) 13(1300)
Размеры рабочего пространства, м: ширина x длина x высота	0,1x0,3x0,1	0,1x0,3x0,1	0,2x0,4x0,2	0,15x0,4x0,15
Масса загрузки, кг	15	12	30	20
Остаточное давление, Па	$10^{-2} - 10^{-3}$	$10^{-2} - 10^{-3}$	$10^{-2} - 10^{-3}$	$10^{-2} - 10^{-3}$
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	0,9	1,2	1,5	1,3
Напряжение питающей сети, В	380/220	380/220	380/220	380/220
Частота питающей сети, Гц	50	50	50	50
Число фаз нагревателя	1	1	1	1
Габаритные	1,5 x 1,8 x 1,8	1,5 x 1,8 x 1,8	1,5 x 2,0 x 1,8	1,5 x 2,0 x 1,8

размеры печи, м: ширина x длина x высота				
Масса печи, т	0,95	1,0	1,2	1,1

Данные по производительности и расходу электроэнергии могут быть уточнены исходя из конкретных данных по температурному режиму технологического процесса.



Рис. 2.6. Высокотемпературная вакуумная печь

Некоторые параметры основных технологических процессов, проводимых в вакууме приведены в (таб. 2.8):

Таблица 2.8

Параметры основных технологических процессов

Техпроцессы	Материалы	Основные параметры процесса	
		Температура, 0С	Вакуум, Па
	Лейкосапфир и фианиты различной цветовой гаммы.	1200-1900	$10^{-1} - 10^{-2}$
Термообработка и спекание	Магнитные материалы систем ЮНДК, Nd-Fe-B, SmCo ₅ ; и др.	1000-1300	$10^{-1} - 10^{-3}$
	Титан, цирконий и сплавы на их основе.	900-1300	$10^{-1} - 10^{-2}$
	Высоколегированные стали, в том числе быстрорежущие, пермаллой.	900-1300	$10^{-1} - 10^{-2}$

	Молибден, ниобий, вольфрам и их сплавы.	1600-2000	$10^{-1} - 10^{-3}$
	Редкие и редкоземельные металлы и их сплавы, в том числе: скандий, иттрий, неодим, самарий, эрбий.	1000-1300	$10^{-1} - 10^{-2}$
	Оксидная керамика на основе Al_2O_3 , ZrO_2 ;; UO_2 .	1600-2000	$10^{-1} - 10^{-2}$

Высокотемпературная вакуумная печь VHT 8/22-GR (Германия)

Модель: VHT 8/22-GR

T max, °C: 2200

Внутренние размеры (Ш Г В), мм: 170 x 240 x 200

Объем в л:8

Внешние размеры (Ш Г В), мм: 1250 (800)¹ x 1100 x 2000

Мощность, кВт: 27

Электросеть: 3-фазная

Вес, кг: 1200

Изоляционный материал/нагреватель: Графит/Графитовый войлок

Компактные печи типа VHT разработаны в виде электрически обогреваемых камерных печей с графитовым, молибденовым нагревом или нагревом дисилицидом молибдена. Благодаря изменяющимся концепциям нагрева и многочисленным принадлежностям эти печи дают возможность реализовывать даже технически сложные процессы, необходимые заказчику. В вакуумоплотном резервуаре можно проводить процессы термической обработки либо под защитной атмосферой и атмосферой реакционного газа, либо под вакуумом, в зависимости от конструкции до 10^{-5} мбар. Оснащенные соответствующими устройствами безопасности печи можно использовать для работы с водородом. Концепции нагрева Графит – VHT/GR:

- Используется для процессов под защитной атмосферой и атмосферой реакционного газа или под вакуумом

- T_{макс} 1800 °C и 2200 °C

- Графитовая войлочная изоляция

- Измерение температуры термоэлементом типа В (версия до 1800 °С)
- Измерение при помощи оптического пирометра (версия до 2200 °С)

Молибден – VHT ../МО:

- Используется для процессов под защитной атмосферой и атмосферой реакционного газа высокой чистоты или под высоким вакуумом до 10^{-5} мбар

- $T_{\text{макс}}$ 1600 °С

- Изоляция из молибденовой листовой стали

Дисилицид молибдена – VHT ../КЕ:

- Используется для технологий в атмосфере защитного и реакционного газа либо на воздухе или под вакуумом

- $T_{\text{макс}}$ 1800 °С

- Изоляция из волокна оксида алюминия высокой чистоты

Базовая версия VHT (все концепции нагрева):

- Стандартные размеры пространства печи 8, 40 или 100 литров

- Охлаждаемый водой со всех сторон резервуар из высококачественной стали, уплотненный температуростойкими кольцами круглого сечения

- Рама из устойчивых стальных профилей, легкая в обслуживании благодаря легко снимаемым обшивочным листам из высококачественной стали

- Корпус модели VHT 8 на колесиках для удобного перемещения печи

- Распределитель охлаждающей воды с кранами ручной блокировки для прямого и обратного хода, автоматический контроль расхода, открытая система водяного охлаждения

- Настраиваемая циркуляция охлаждающей воды с индикатором расхода и температуры и защитой от превышения температуры

- Распределительное устройство с контроллером интегрировано в корпус

- Регулирование ПЛК Н 700 с удобной панелью управления 5,7“ (исполнение с сенсорной панелью) для ввода программ и визуализации, сохраняется 10 программ по 20 сегментов

- Ограничитель регулятора температуры с настраиваемой температурой отключения для термического класса защиты 2 согл. EN 60519-2

- Ручное управление функциями технологического газа и вакуума

- Ручная подача газа (N_2 или Ar) с настраиваемым уровнем расхода

- Байпас с ручным клапаном для быстрого наполнения или затопления пространства печи

- Выпуск газа вручную с перепускным клапаном (20 мбар относит.)

- Одноступенчатый пластинчатый насос с шаровым затвором для создания форвакуума и для термической обработки в низком вакууме до 5 мбар

- Манометр для визуального контроля уровня давления

Дополнительное оснащение:

- Подача газа вручную для второго технологического газа (N_2 или Ar) с настраиваемым уровнем расхода и байпасом

- Молибденовая либо ХФУ-графитная реторта с прямой подачей газа для чистой атмосферы и лучшего распределения температуры в пространстве

печи

- Термоэлемент для садки с индикатором

- Двухступенчатый пластинчатый насос с шаровым затвором для создания форвакуума и для термической обработки в вакууме до 10^{-2} мбар

- Охлаждающая станция с замкнутой циркуляцией воды.

Благодаря использованию автоматических клапанов для управления технологическим либо отработанным газом и эффективному регулированию H3700 весь процесс термической обработки может выполняться полностью автоматически. Ввод всех технологических данных (температуры, степени нагрева, подачи газа и вакуума) осуществляется с помощью удобной большой графической панели управления 12". Статус установки, включая все необходимые технологические данные, наглядно представлен на технологической схеме. Все клапаны и вакуумный насос также могут быть выбраны вручную. Установка имеет автоматическую предварительную и завершающую программу для инертизации пространства печи и автоматической проверки герметичности. Автоматическая версия VHT

Свойства как у базовой версии VHT, плюс:

- Автоматическая подача технологического газа (N_2 или Ar) с настраиваемым уровнем расхода

- Байпас для быстрого заполнения или затопления пространства печи

- Автоматический выход газа с сильфонным и перепускным клапаном

(20 мбар)

- Одноступенчатый пластинчатый насос с сильфонным клапаном для создания форвакуума и для термической обработки в низком вакууме до 20 мбар

- Датчик давления для абсолютного и относительного давления

- Регулирование с H3700 (10 прог. / 20 сегментов)

- Управление с помощью графической панели управления 12“ (исполнение с сенсорной панелью)

Дополнительное оснащение:

- Регулятор массового расхода MFC для изменяющегося объема потока и создания газовых смесей (со вторым технологическим газом)

- Регулирование печного давления с настраиваемым клапаном отработанного воздуха (регулирование парциального давления)

- Факел отработанного газа (газо- или электронагреваемый) для дожигания обусловленного процессом отработанного газа

- Водные охладители отработанного газа

- Конденсатоуловители для отделения большого количества связующего вещества

- Двухступенчатый пластинчатый насос с сильфонным клапаном для создания форвакуума и для термической обработки в вакууме до 10-2 мбар

- Насосный стенд с турбомолекулярным насосом с задвижкой для создания форвакуума и термической обработки в вакууме до 10-5 мбар (только для молибденового исполнения), включая электрический датчик давления и форвакуумный насос

- ПК-управление с помощью NCC, соответствующие возможности документации и привязки к компьютерной сети



заказчика

Рис. 2.7. Фотография высокотемпературной вакуумной печи VHT 8/22-GR

2.4.3. Способ вакуумной термической обработки мелкогабаритного инструмента из быстрорежущей стали

Изобретение относится к металлургии в частности, к термической обработке режущего и формообразующего инструмента и оснастки из теплостойких высоколегированных сталей с применением вакуумных печей различных конструкций.

Цель изобретения повышение уровня технологичности при снижении трудоемкости обработки, снижение деформации и повышение износостойкости инструмента.

Предложенный способ, включающий нагревы в вакууме на приспособлениях режущего инструмента с выдержкой при температурах закалки 1070-1180°C и охлаждение с регламентированной скоростью, предусматривает проведение нагрева со скоростью 15-50 °C/мин. выдержку в течение 10-15 минут и

охлаждение со скоростью 0,9- 1,1оС/с до 600- 700оС при проведении отпуска в вакууме 10⁻¹- 10⁻⁵ мм. рт. ст. при температуре 180- 580оС. Одновременно предусматривается выдержка при 990- 1000 оС в процессе нагрева для закладки в течение двух минут при проведении закалки в колпаковой вакуумной печи. Кроме того, охлаждение инструмента, размещенного на этажерочном приспособлении, не касаясь друг друга, предусмотрено вести до температур 100 150оС без развакуумирования печи с последующим нагревом под отпуск. Размещение инструмента осуществляют на приспособлении подвеской по периметру вакуумной нагревательной камеры.

Вакуумное нитрооксидирование для некоторых видов инструмента проводят одновременно с отпуском, с охлаждением от температур отпуска в растворах поверхностно-активных веществ, в том числе эпилам, а в варианном исполнении охлаждение при закалке и отпуске, проводимое с регламентированными скоростями, завершают обработкой в жидком азоте в течение 5-10 минут.

Сущность протекающих процессов в новой технологии обработки.

Выбранная температура и скорость нагрева в вакууме таковы, что позволяют достичь растворения в твердом растворе значительного количества углерода и легирующих элементов, в процессе заданного времени выдержки твердый раствор дополнительно обогащается легирующими. Одновременно не происходит катастрофического роста зерна аустенита, влияющего на ударную вязкость быстрорежущей стали к закаленному и отпущенному состоянию, достигается оптимальное соотношение прочности износостойкости и вязкости; нестандартные скорости охлаждения с одной стороны позволяют в выбранном интервале температур предотвратить развитие промежуточных превращений аустенита, получить мартенситную структуру с высокой твердостью, с повышенным содержанием в структуре дисперсных карбидов, что улучшает износостойкость и контактную прочность при трении. Одновременно снижается тепловая и структурная деформация тонколезвийного инструмента с резкими переходами сечений;

Нитрооксидирование в вакууме в процессе отпуска повышает антифрикционные свойства поверхности, повышает объемную и поверхностную твердость и в совокупности с образованием пленки при охлаждении в

поверхностно активных средах, эпиламах улучшает условия резания, повышает износостойкость инструмента;

Размещение инструмента по периметру нагревательного колпака вакуумной печи на этажерочных приспособлениях, не касаясь друг друга, позволяет вести нагрев и охлаждение с одинаковыми для всех деталей скоростями и получать равномерную твердость по всей садке. При проведении отпуска без разгерметизации нагрев и охлаждение проводится также при одном температурном перепаде при температурах ниже температур красного каления стали, обеспечивается равномерное вторичное твердение и минимальная тепловая поводка инструмента.

Практически способ осуществлен на пяти двухколпаковых вакуумных печах СГВ-2,4/15И1-МЗ с предельным вакуумом 10-5 мм.рт.ст. варианты процессы отпуска, нитрооксидирования проводили с применением печей СШОЛ-ВНЦ, СНОЛ-ВНЦ и шкафов СНОЛ, СНВЛ-3.3.3./3,5. Вакуумной термической обработке подвергли инструмент, оснастку, детали из сталей Р6М5, Р6М5-П, Р6М5-МП, Р6М5К5.

Сверла двухперые, полые, диаметром 5,6 мм для обработки прецизионных деталей из сплава 29НК изготавливались из стали-серебрянки Р6М5 и термообрабатывались по предложенному способу.

Садку из 12 сверл нагревали до 1180оС со скоростью 50 оС/мин и после выдержки в течение 10 минут охлаждали в вакууме со скоростью 0,9оС/с до 600оС, затем с печью. Первый отпуск проводили в вакууме 10-5 мм.рт.ст. в этом же колпаке, без разгерметизации печи с выдержкой 45 минут.

После алмазной доводки режущих граней проводили отпуск с одновременным нитрооксидированием в вакууме при 540оС в атмосфере пиролиза этаноламинов при длительности выдержки 30 минут, с охлаждением в вакуумном масле с ПАВ.

Обработка позволила сократить трудоемкость термических операций в 1,5 раза, исключена подводка по длине сверла, износостойкость повысилась до 32 - 33 деталей против 21- 23 деталей при обработке по известному режиму. Ударная вязкость на образцах без надреза была не хуже 4,5 5,2 Дж/см², выкрашивания режущих кромок не наблюдалось.

Метчики с трапециодальной резьбой диаметром 6- 8 мм для обработки ниобиевых шнековидных деталей изготавливали из стали Р6М5-П и закаливали в вакууме при температуре нагрева 1160оС, при этом нагрев вели со скоростью 15оС/мин с выдержкой при 990 1000оС в течение двух минут и при температуре закалки в течение 12 минут. Охлаждение проводили со скоростью 1,1оС/с до 650оС, затем с печью.

Первый отпуск проводили при 520оС в течение 30 минут на воздухе, а после резьбошлифования выдерживали метчики в жидком азоте в течение 10 минут и после доводки по передней грани нитрооксидировали в вакууме при 580оС в течение 30 минут при давлении 10-1 мм.рт.ст. с охлаждением через воздух в эпиламе эфрен. При твердости НРСэ 59 60 износостойкость повысилась в 1,6 раза, трудоемкость термообработки сократилась на 35 повысилась чистота обработки деталей, исключено выкрашивание зубьев метчиков.

Иглы клапанов впрыска дизельного топлива дизельных двигателей НВ14-12 изготавливали из стали Р6М5 и при поштучной подвеске через технологические отверстия на приспособление из нержавеющей стали, по обечайке приспособления по периметру нагревательной камеры вакуумной печи СГВ-2.4./15 закаливали от температуры 1180оС. Прогрев вели при скорости 30оС/мин, охлаждение после выдержки в течение 15 минут осуществляли со скоростью 1оС/с до 700оС, далее с печью до 100оС. Отпуск проводили в

Этой же печи при 550оС в вакууме 10-5 мм.рт.ст. в течение 60 минут, далее, после притирки уплотнительных поверхностей выдерживали детали в жидком азоте в течение 10 минут и доводили до зеркальной основную рабочую поверхность.

Обработка позволила в 2 раза сократить припуски на шлифование, полирование, доводку, получать иглы с износостойкостью в 1,5 ресурса по сравнению со стандартными. При твердении выше НРСэ 61,5 прочность при изгибе составила 34000 МПа, суммарное время работы игл превысило 5140 часов.

Волочильные фильеры для калибрования капиллярных трубок из стали 12Х18Н12С4ТЮ (ЭИ654) диаметром 0,6 мм изготавливали из стали Р6М5К5-П и обрабатывали по предложенному способу с припуском на доводку отверстия 20-15 мкм. Вакуумную закалку проводили от температуры 1160оС при скорости

нагрева 30оС/мин с выдержкой при 990оС в течение 2 минут и далее при температуре закалки в течение 14 минут. Скорость охлаждения была 0,9 оС/с, далее с печью до 100 оС с последующей разгерметизацией и выгрузкой на воздух. После доводки фильеры отпускали с одновременным вакуумным нитрооксидированием в печи "Терм-1" в вакууме 10-1 мм.рт.ст в атмосфере пиролиза этаноламинов с добавкой кубовых остатков регенерации этилена. Охлаждение от температуры нитрооксидирования 520 оС проводили в вакуумном масле VM-5 с ПАВ.

В результате получены фильеры с износостойкостью 370- 390 часов, с микротвердостью Н0,49 817- 878, при одновременном снижении трудоемкости изготовления и обработки в 1,5 раза.

Данный способ вакуумной термической обработки мелкогабаритного инструмента из быстрорежущей стали, включающий размещение инструмента в нагревательной камере вакуумной печи, нагрев до температуры закалки 1070- 1180 оС, выдержку при этой температуре, охлаждение с регламентируемой скоростью до регламентируемой температуры, далее с печью и отпуск, отличается тем, что нагрев ведут со скоростью 15- 50 оС/мин, выдержку осуществляют в течение 10-15 мин, охлаждение проводят со скоростью 0,9- 1,1оС/с до 600- 700оС, а отпуск проводят в вакууме 10-1- 10-5 мм рт.ст. при 180 - 580оС.

Способ отличается тем, что в процессе нагрева осуществляют выдержку при 990 1000оС в течение 2 мин., а также тем, что нагрев под закалку, закалку и отпуск проводят в колпаковой вакуумной печи без ее разгерметизации и выгрузки инструмента. Иногда после закалки и отпуска проводили обработку в жидком азоте.

2.4.4. Устройство для термической обработки материалов в вакууме

Изобретение относится к машиностроению, преимущественно к обработке изделий из конструкционных материалов (металлов и сплавов), например матриц, в вакууме.

Известны устройства для термической обработки материалов в условиях пониженного давления, то есть вакуума [1], в частности специализированные вакуумные печи для термической обработки материалов.

Наиболее близким аналогом по технической сущности является продукция фирмы SECO-WARWICK Ltd.- печи с цилиндрической или прямоугольной вакуумной нагревательной камерой, характеризующиеся относительно высокой скоростью охлаждения обрабатываемых материалов за счет потока азота повышенного давления [2].

Аналоги отличаются сравнительно большими массогабаритными параметрами, большим расходом энергии для нагрева обрабатываемых материалов, кроме того для охлаждения материалов используют поток газа, запускаемого в камеру с обрабатываемыми материалами (изделиями). Основной причиной, препятствующей эффективному нагреву и охлаждению материалов, является плохая теплопередача от нагревателя (нагретых стенок) к материалу и охлаждение потоком газа с низкой теплоемкостью, что не позволяет провести быстрый нагрев и охлаждение материалов. Известно, что в развитии технологии термической обработки в вакууме основное значение имеет скорость охлаждения материалов.

Целью изобретения является увеличение эффективности термической обработки образцов за счет повышения скорости нагрева и охлаждения в вакууме, а также снижение затрат энергоносителей на обработку материалов (изделий).

Поставленная цель достигается за счет использования конструкции устройства, в котором нагревание подвижного образца осуществляют потоком электронов в вакууме, а охлаждение проводят за счет теплового контакта образца с массивной холодной поверхностью.

Сущность изобретения заключается в том, что в предлагаемом устройстве в условиях вакуума обрабатываемый материал (образец) перемещается, нагрев обрабатываемых материалов в вакууме осуществляют за счет потока ускоренных электронов от нагреваемого катода, а охлаждение производят за счет механического теплового контакта с массивной охлаждаемой поверхностью при перемещении образца.

Это позволяет производить нагрев только обрабатываемого материала (образца) за счет выделения в его поверхностном слое энергии ускоренных от катода электронов. Температура образца зависит только от удельной мощности, выделяемой на поверхности обрабатываемого изделия. Остальные части

конструкции вакуумной камеры при этом не нагреваются. Охлаждение происходит при тепловом (механическом) контакте образца с массивной охлажденной поверхностью, что приводит к быстрому спаду температуры.

Устройство для термической обработки материалов в вакууме включает в себя следующие основные элементы:

- накальный изолированный термический катод из тугоплавкого материала,
- изолированный стальной тепловой экран, на котором закреплен катод,
- подвижная стальная пластина с приводом от ввода движения в вакуум,
- обрабатываемый образец, закрепленный на стойке подвижной пластины,
- охлаждаемый неподвижный диск, имеющий водяное охлаждение,
- блок питания катода, обеспечивающий накал катода и подачу высокого напряжения.

Конструкцию устройства поясняет (рис.2.8.), на которой приведено взаиморасположение основных элементов.

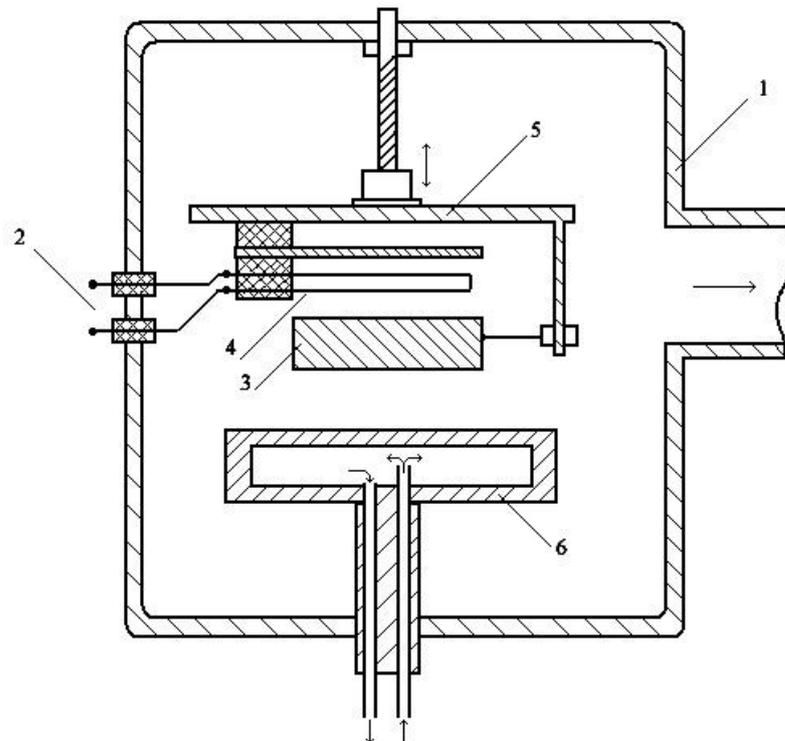


Рис. 2.8. Схема устройства для термической обработки материалов в вакууме
1-вакуумная рабочая камера, 2-электрические высоковольтные вводы в камеру,
3-обрабатываемый материал (образец), 4-накальный вольфрамовый термокатод,
5-подвижная пластина, 6-охлаждаемый водой медный диск.

Устройство встраивают в вакуумную рабочую камеру вакуумной установки, имеющей стандартные средства получения и контроля степени вакуума 10^{-1} - 10^{-4} Па.

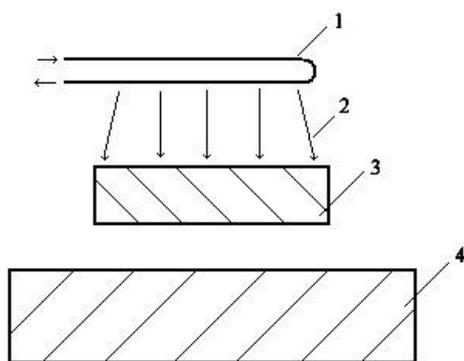
Блок питания устройства обеспечивает возможность пропускания регулируемого тока накала через нагреваемый катод, а также подачу отрицательного напряжения на этот же катод относительно заземленных частей устройства и вакуумной рабочей камеры. Блок питания включает в себя повышающий трансформатор, выпрямитель, элементы защиты от перегрузок и контроля напряжения и тока нагрузки, а также регулируемый трансформатор тока накала катода. Высокое напряжение подают на среднюю точку выходной обмотки трансформатора тока накала.

Устройство для термической обработки материалов в вакууме работает следующим образом.

В оснастке на стойке устройства закрепляют обрабатываемый материал (образец). В вакуумной рабочей камере создают степень вакуума 10^{-1} - 10^{-4} Па с использованием стандартных средств получения и измерения вакуума.

Включают питание устройства и пропускают по термическому катоду ток накала, в результате чего за счет нагрева поверхности катода возникает эмиссия (ток) электронов по направлению к заземленному обрабатываемому образцу. При этом на поверхности обрабатываемого материала выделяется мощность, пропорциональная току электронов и напряжению на термокатоде. Степень нагрева обрабатываемого материала зависит от удельной мощности, выделяемой на поверхности образца. Остальные части устройства нагреваются только за счет теплопередачи энергии от образца к ним в вакууме.

Путем регулировки тока устанавливают заданный режим нагрева образца, который контролируют по температуре образца стандартными методами измерений (оптическими или термопарными). Предельная температура образца зависит от выделяемой электронами удельной мощности. Так при мощности 1 Вт/см^2 температура достигает $300\text{-}350 \text{ }^\circ\text{C}$, при 10 Вт/см^2 $700\text{-}800 \text{ }^\circ\text{C}$, при 50 Вт/см^2 превышает $1100 \text{ }^\circ\text{C}$.



Затем нагрев образца отключают и путем перемещения пластины с закрепленным образцом приводят обрабатываемый материал (образец) в механический контакт с охлаждаемой поверхностью. Возможно также охлаждение образца без отключения нагрева образца. За счет надежного механического

контакта с охлаждаемой поверхностью обрабатываемый материал быстро охлаждается в условиях вакуума.

Схему процесса обработки материала иллюстрирует (рис.2.9)

Рис. 2.9. Схема термической обработки (нагрева и охлаждения) материалов в вакууме. 1-накальный термокатод под отрицательный потенциалом, 2- поток ускоренных электронов, 3-обрабатываемый материал (образец), 4-охлаждаемая поверхность.

Пример выполнения устройства. В вакуумную рабочую камеру установки типа УВН-75Р встраивают описанное устройство для термической обработки материалов в вакууме. Устройство имеет привод движения от вакуумного ввода в камеру. Накальный катод соединяют с электрическими вводами в вакуум и блоком питания. В устройстве закрепляют обрабатываемый образец и вводят вакуумный пост установки в рабочий режим. После достижения степени вакуума 10^{-3} Па на катод подают напряжение 3,5-4,0 кВ. Путем повышения тока накала катода устанавливают ток эмиссии 100-200 мА и контролируют температуру образца по показаниям оптического пирометра. После достижения температуры 1000-1100 °С блок питания отключают и включают привод движения образца до момента контакта образца с медным водоохлаждаемым диском. После охлаждения образца проводят напуск воздуха и извлекают обработанный образец.

Таблица 2.9

Сравнительные параметры предлагаемого устройства и прототипа приведены в таблице

Параметры устройства	Печь (прототип)	Предлагаемое устройство
Габариты устройства, мм	900x800x1200	Менее 150x150x200

Температура нагрева, °С	700-800	До 1100
Скорость охлаждения, °С/мин	50-80	Более 6000
Расходный материал	азот, гелий	нет

Глава III.

3. Термодинамическое моделирование вакуумно-термической обработки быстрорежущих сталей

3.1. Моделирование фазовых превращений быстрорежущих сталей при вакуумно-термической обработке

Задача моделирования процесса вакуумно-термической обработки быстрорежущих сталей заключается в определении фазового и химического составов при заданных режимов обработки. При моделировании также возможно установление взаимосвязи между технологическими параметрами процесса и фазовым составом быстрорежущих сталей.

Для расчета фазового и химического состава быстрорежущих сталей, при вакуумно-термической обработке применен термодинамический метод прогнозирования, базирующийся на программном комплексе АСТРА. В основу алгоритма расчета положен универсальный термодинамический метод (метод Гиббса) определения характеристик равновесия произвольных гетерогенных систем [1]. Исходными данными при моделировании процесса вакуумно-термической обработки быстрорежущих сталей являются: давление в камере (Па), температура подложки (К) и химический состав стали.

Рассматриваемые системы, предусматривающие взаимодействие газа и металла в вакууме с образованием газовых и конденсированных фаз в процессе вакуумно-термической обработки быстрорежущих сталей не являются изолированными, поэтому при моделировании фазовых превращений принимаются следующие допущения:

а) рассматривается не процесс установления равновесия в системе (ибо тогда характеристики системы являются функциями пространства и времени), а некоторое окончательное состояние равновесия системы с соответствующим ему фазовым составом. В данном случае используется гипотеза локального термодинамического равновесия, которая предполагает наличие как внешнего энергетического и теплового равновесия, так и внутреннего фазового и химического равновесия (т.е. фазовые и химические реакции протекают с бесконечно большой скоростью). В данном случае результаты термодинамического расчета аналогичны получаемым при рассмотрении фазовой диаграммы;

б) предполагается, что температура образца не влияет на температуру газа;

в) не учитываются десорбция и адсорбция молекул газа с поверхностью твердого тела.

В расчетах учитывали возможность образования однокомпонентных фаз, а также конденсированных растворов из всех конденсированных веществ, для которых были известны термодинамические и термохимические свойства. В соответствии с созданной моделью проведены расчеты фазового и химического состава быстрорежущих сталей Р18 и Р6М5К5 при соответствующей температуре термической обработки.

Задача расчета термодинамического равновесия заключается в определении всех равновесных параметров и термодинамических свойств рабочего тела.

Эта задача была решена применительно к многокомпонентным системам. Многокомпонентные системы включают: индивидуальные газообразные химические вещества в электронейтральном и ионизированном состояниях, конденсированные вещества и конденсированные твердые растворы.

Состояние такой системы характеризуется ее составом, т.е. содержанием компонентов, выраженным в числах молей на единицу массы рабочего тела. В качестве компонентов рассматриваются индивидуальные вещества, которые и образуют систему в равновесии, входя в состав газовой или конденсированных фаз. Кроме того, состояние термодинамической системы описывается величинами давления (P), удельного объема (V), температуры (T), полной внутренней энергии (U_{II}), полной энтальпией (I) и энтропией (S).

Для характеристики состояния системы, необходимо и достаточно задать только содержание химических элементов в рабочем теле и численные значения двух термодинамических параметров. В расчете задавались содержание химических элементов: Вольфрам (W), Ванадий (V), Кобальт (Co), Кремний (Si), Марганец (Mn), Молибден (Mo), Никель (Ni), Хром (Cr), Углерод (C), Сера (S), Фосфор (P), давление реакционного газа P и T – температура процесса.

Наиболее общим параметром, по которому можно судить о том, находится ли термодинамическая система в состоянии равновесия или нет, является величина энтропии системы.

Энтропия связана со степенью упорядоченности энергетического состояния микрочастиц, из которых состоит рабочее тело. Поскольку всякая термодинамическая система является макроскопической и содержит очень большое число микрочастиц (атомов, молекул, ионов и т.д.), то ее термодинамические параметры (включая концентрацию компонентов) с весьма высокой степенью точности могут быть приняты равными средним статистическим величинам, определенным, исходя из распределения микрочастиц по энергетическим уровням. При этом равновесному состоянию системы соответствует наименее упорядоченное, наиболее хаотичное из всех возможных распределений частиц по уровням энергии. Такое распределение при большом числе частиц является наиболее вероятным и может быть рассчитано на основании законов теории вероятности, приложенных к возможным энергетическим состояниям микрочастиц. Любая изолированная макросистема, не находящаяся в состоянии статистического равновесия, в результате взаимодействия микрочастиц между собой будет переходить в состояние с большей вероятностью, а в пределе – к наиболее вероятному энергетическому состоянию.

Статистическая физика позволяет найти число дискретных состояний, которыми реализуется данное макросостояние. Сопоставление этой величины с энтропией, как она определена в феноменологической термодинамике, позволяет установить, что последняя является мерой вероятности состояния системы. Соответственно и максимум энтропии отвечает условиям равновесия рассматриваемой совокупности частиц.

Если известно наиболее вероятное распределение микрочастиц по

энергетическим уровням, то могут быть рассчитаны все параметры равновесного состояния сложных макроскопических систем. Рассуждая таким образом, можно выполнять подсчет вероятности состояния и для однокомпонентных систем, состоящих из индивидуального единственного химического вещества, и вычислять (а не определять экспериментально) термодинамические свойства простых соединений – внутреннюю энергию, энтальпию, теплоемкость и энтропию.

Для выполнения расчетов свойств индивидуальных веществ должны быть экспериментально найдены те параметры микрочастиц, которые определяют величины энергетических уровней.

Расчет равновесия многокомпонентных термодинамических систем может быть сведен к задаче определения состояния, характеризуемого экстремумом (максимумом) энтропии. Поэтому для составления искомой системы уравнений необходимо найти аналитическую связь между величиной энтропии единицы массы рабочего тела и термодинамическими параметрами, определяющими ее состав, свойства и условия существования.

Энтропия (S) сложной системы складывается из энтропии составляющих ее частей. Если разбить сложную систему на более простые составляющие (подсистемы), то суммарную энтропию можно вычислять как сумму энтропий этих подсистем:

$$S = S' + S'' + S''' = \sum_{i=1}^k (S_i^0 - R_0 \ln P_i) M_i + \sum_{r=1}^R S_r^0 M_r + \sum_{n_1=1}^{N_1} S_{n_1}^0 M_{n_1} - \sum_{n_1=1}^{N_1} R_0 M_{n_1} \ln M_{n_1} / M_{x_1} + \sum_{n_2=1}^{N_2} S_{n_2}^0 M_{n_2} - \sum_{n_2=1}^{N_2} R_0 M_{n_2} \ln M_{n_2} / M_{x_2}, \quad (3.1)$$

где $S' = \sum_{i=1}^k (S_i^0 - R_0 \ln P_i) M_i$ – энтропия газовой фазы системы (первая подсистема);

M_i – число молей компонентов газовой фазы (содержание компонентов газовой фазы $i=1, 2, 3, \dots, k$) выражается в молях на килограмм рабочего тела M_r);

S – стандартная энтропия i -го компонента при температуре T и давлении равном 1 физ. атм;

$P_i = R_0 T M_i / V$ – парциальное давление;

V – удельный объем всей системы;

$$S'' = \sum_{r=1}^R S_r^0 M_r - \text{энтропия компонентов, находящихся в конденсированном}$$

(твердом или жидком) состоянии и образующих отдельные фазы (вторая подсистема);

S_r^0 – энтропия конденсированной фазы, отнесенная к 1 молю индивидуального вещества;

M_r – число молей в 1 кг рабочего тела;

R – общее число отдельных конденсированных фаз.

К третьей подсистеме отнесены конденсированные растворы X_1 и X_2 . При этом перечень веществ, входящих в каждый из этих растворов, назначается заранее, исходя из логических соображений или результатов обработки экспериментальных данных.

В формуле (2.1) M_{n_1} и M_{n_2} – число молей веществ входящих соответственно в растворы X_1 и X_2 .

Общее число молей в каждом из растворов в расчете на 1 кг массы рабочего тела составит:

$$M_{x_1} = \sum_{n_1=1}^{N_1} M_{n_1} \quad \text{и} \quad M_{x_2} = \sum_{n_2=1}^{N_2} M_{n_2},$$

N_1 и N_2 – число компонентов, образующих растворы X_1 и X_2 ;

$$\Delta S_{\text{раств}X_1} = \sum_{n_1=1}^{N_1} R_0 M_{n_1} \ln M_{n_1} / M_{X_1},$$

$$\Delta S_{\text{раств}X_2} = \sum_{n_2=1}^{N_2} R_0 M_{n_2} \ln M_{n_2} / M_{X_2}, \quad - \text{энтропия растворения раствора } X_1 \text{ и } X_2$$

соответственно (она вычисляется как для смеси не взаимодействующих частиц);

$S_{n_1}^0$ и $S_{n_2}^0$ – энтропия веществ, входящих в растворы.

Определение параметров равновесного состояния заключается в нахождении значений всех зависимых переменных, включая числа молей компонентов, при которых величина S достигает максимума. При отыскании экстремума на величины искомым неизвестных налагаются следующие дополнительные связи, отражающие условия.

1. При всех возможных фазовых и химических превращениях, происходящих в системе в связи с установлением равновесия, величина полной внутренней энергии должна оставаться неизменной, ибо система по условию является изолированной:

$$-U_{\Pi} + \sum_{i=1}^k M_i U_{\Pi i} + \sum_{r=1}^R M_r U_{\Pi r} + \sum_{n_1=1}^{N_1} M_{n_1} U_{\Pi n_1} + \sum_{n_2=1}^{N_2} M_{n_2} U_{\Pi n_2} = 0 \quad (3.2)$$

2. При установлении равновесного состояния в системе должен соблюдаться закон сохранения массы всех химических элементов. Поэтому количество молей любого j -го элемента в исходном и конечном равновесных состояниях должно быть одинаковым, т. е.

$$-[\Delta L_j] + \sum_{i=1}^k M_i n_{ji} + \sum_{r=1}^R M_r n_{jr} + \sum_{n_1=1}^{N_1} M_{n_1} n_{jn_1} + \sum_{n_2=1}^{N_2} M_{n_2} n_{jn_2} \quad (j=1, 2, \dots, m), \quad (3.3)$$

где n_{ji}, n_{jr}, n_{jn_1} , и n_{jn_2} – стехиометрические коэффициенты, т. е. числа атомов j -го элемента в соответствующем индивидуальном веществе – компонента системы. Число таких уравнений равно числу химических элементов, образующих рабочее тело.

3. При всех превращениях в рабочем теле должен соблюдаться закон сохранения электрического заряда (условие электронейтральности рабочего тела), поэтому

$$\sum_{i=1}^k M_i n_{ei} = 0, \quad (3.4)$$

где n_{ei} – определяет знак и кратность ионизации компонента.

Для однократно положительно заряженных ионов $n_{ei}=+1$, для двукратно положительно заряженных частиц $n_{ei} = +2$, для электронного газа $n_{ei} = -1$, для отрицательно заряженных ионов n_{ei} принимает отрицательные значения.

В дальнейшем предполагается, что конденсированные фазы любых видов не ионизируются и не содержат электроразряженных компонентов.

4. При всех превращениях рабочего тела газовая фаза системы подчиняется уравнению состояния смеси идеальных газов:

$$PV - R_0 T \sum_{i=1}^k M_i = 0. \quad (3.5)$$

Использование уравнения состояния в таком виде равносильно допущению,

что объем, занимаемый веществами в конденсированной фазе, пренебрежимо мал.

5. Для компонентов, вошедших в растворы X_1 и X_2 , принимаются условия нормировки:

$$M_{X_1} - \sum_{n_1=1}^{N_1} M_{n_1} = 0, \quad M_{X_2} - \sum_{n_2=1}^{N_2} M_{n_2} = 0. \quad (3.6)$$

Таким образом, задача определения параметров состояния исследуемых систем сводится к нахождению условного экстремума величины S , при соблюдении условий 1–5, т. е. при соблюдении ограничений на допустимые изменения параметров.

Для отыскания этого условного экстремума предлагается использовать метод Лагранжа, в соответствии с которым составляется вспомогательная функция Лагранжа

$$L = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + \sum_s \lambda_s \varphi_s(X_1, X_2, \dots, X_n),$$

где $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ – функция, для которой ищется условный экстремум.

В нашем случае это выражение для энтропии, стоящее в правой части уравнения (3.7);

φ_s – условия, ограничивающие область допустимых значений переменных (выражения, стоящие слева в уравнениях (3.2)–(3.6));

λ_s – неопределенные множители Лагранжа;

s – число условий.

Произведя подстановки, получим выражение для функции L

$$\begin{aligned} L = & \left[\sum_{i=1}^k (S_i^0 - R_0 \ln R_0 T M_i / V) M_i + \sum_{r=1}^R S_r^0 M_r + \sum_{n_1=1}^{N_1} (S_{n_1}^0 - R_0 \ln M_{n_1} / M_{X_1}) M_{n_1} + \right. \\ & \left. + \sum_{n_2=1}^{N_2} (S_{n_2}^0 - R_0 \ln M_{n_2} / M_{X_2}) M_{n_2} \right] + \left[-U_{II} + \sum_{i=1}^k M_i U_{IIi} + \sum_{r=1}^R M_r U_{IIr} + \sum_{n_1=1}^{N_1} M_{n_1} U_{II n_1} + \right. \\ & \left. + \sum_{n_2=1}^{N_2} M_{n_2} U_{II n_2} \right] \lambda_u + \left[PV - R_0 T \sum_{i=1}^k M_i \right] \lambda_{pv} + \sum_{i=1}^k M_i n_{ei} \lambda_e + \sum_{j=1}^m (-[\mathcal{E}L_j] + \\ & \sum_{i=1}^k M_i n_{ji} + \sum_{r=1}^R M_r n_{jr} + \sum_{n_1=1}^{N_1} M_{n_1} n_{jn_1} + \sum_{n_2=1}^{N_2} M_{n_2} n_{jn_2}) \lambda_j + (M_{X_1} - \sum_{n_1=1}^{N_1} M_{n_1}) \lambda_{X_1} + \\ & (M_{X_2} - \sum_{n_2=1}^{N_2} M_{n_2}) \lambda_{X_2}, \end{aligned} \quad (3.7)$$

где λ_j ($j=1, 2, \dots, m$), λ_e , λ_u , λ_{pv} , λ_{x1} , λ_{x2} – неопределенные множители Лагранжа.

Для того чтобы найти экстремум величины S , необходимо продифференцировать полученную функцию L по всем независимым переменным и найденные выражения приравнять нулю. Составленная таким образом система уравнений позволяет связать все неизвестные величины с помощью относительно простых алгебраических соотношений. Отметим, что в нашем случае функция Лагранжа содержит следующие переменные величины: M_i ($i=1, 2, \dots, k$), M_r ($r=1, 2, \dots, R$), M_{x_1} , M_{n_1} ($n_1=1, 2, \dots, N_1$), M_{x_2} , M_{n_2} ($n_2=1, 2, \dots, N_2$), λ_j ($j=1, 2, \dots, m$), λ_e , λ_u , λ_{pv} , λ_{x_1} , λ_{x_2} , P , T , V , U_{II} .

Из них удельный объем (V) и полная внутренняя энергия (U_{II}) могут рассматриваться только как зависимые переменные, поскольку их величины при всех рассматриваемых превращениях, приводящих к равновесному состоянию системы, остаются неизменными, хотя в общем случае и неизвестными величинами.

Задача расчета термодинамического равновесия заключается в определении всех равновесных параметров и термодинамических свойств рабочего тела.

Алгоритм расчета универсален и позволяет определять равновесный состав и характеристики смесей, содержащих произвольный набор химических элементов. В равновесном состоянии устанавливается однозначное соответствие между параметрами системы, ее химическим и фазовым составами. Предусматривается возможность образования как газообразных, так и конденсированных веществ, причем последние могут образовывать однокомпонентные фазы, химические соединения и конденсированные растворы. В то же время математическая модель, положенная в основу вычислительного алгоритма предполагает, что рассматриваются либо замкнутые системы, либо системы, находящиеся в состоянии внешнего и полного внутреннего или локального термодинамического равновесия.

Если исходными данными для термодинамического расчета являются содержание компонентов и два термодинамических параметра системы, то для

проведения расчета необходимы термодинамические, теплофизические и термохимические свойства индивидуальных веществ [2-6].

Термодинамические свойства некоторых веществ были рассчитаны с использованием работ [7-12].

В основу алгоритма программы положен универсальный термодинамический метод определения характеристик равновесия произвольных гетерогенных систем, основанный на фундаментальном принципе максимума энтропии. Этот метод предоставляет уникальную возможность обобщенного описания любого высокотемпературного состояния с помощью одних только фундаментальных законов термодинамики, независимо от условий и способов достижения равновесия. Метод требует минимальной информации о самой системе и о ее окружении [13-14].

Формулировка задачи термодинамического моделирования требует назначить два условия равновесия изучаемой системы с окружающей средой. Этими условиями могут быть либо численные значения термодинамических характеристик равновесия, либо функциональные соотношения между параметрами этого состояния. Для описания самой системы, как материального объекта, необходимо знать лишь содержание образующих ее химических элементов. Внутренние и межфазные взаимодействия описываются модельными термодинамическими соотношениями, для замыкания которых используются свойства только индивидуальных веществ компонентов равновесия.

Исходные допущения могут быть сформулированы следующим образом:

- рассматриваются системы в состоянии внешнего и внутреннего термодинамического равновесия (полного или локального);
- рассматриваются замкнутые системы, т.е. не обменивающиеся веществом с окружающей средой;
- присутствие газовой фазы обязательно; газовая фаза описывается уравнением состояния идеального газа;
- поверхностные эффекты на границе раздела фаз не учитываются, растворимость газов в жидких и твердых фазах отсутствует;
- конденсированные вещества образуют однокомпонентные несмешивающиеся фазы либо включаются в состав идеальных конденсированных

растворов.

Расчеты состава фаз и характеристик равновесия проводятся с использованием справочной базы данных по свойствам индивидуальных веществ. База данных является составной частью программного комплекса Астра.4/pc.

Основу информации в базе данных составляют термодинамические, теплофизические и термохимические свойства индивидуальных веществ, систематизированные в Институте высоких температур АН РФ [15], национальном бюро стандартов США [16], опубликованные в периодической печати, монографиях и справочниках [17-21.] а также обработанные и рассчитанные в МГТУ им. Н.Э. Баумана по молекулярным, калориметрическим и спектроскопическим данным.

Глава IV.

4. Расчет вакуумной установки для термической обработки материалов

4.1. Расчет узлов установки вакуумной обработки

Лабораторная установка для проведения процессов вакуумного обезвоживания продуктов типа фруктовых выжимок и таких материалов как дерево состоит из следующих основных узлов и блоков:

1. Станина установки для крепления необходимых узлов и блоков.
2. Кожух (защитные съемные щиты), укрепляемые на станине.
3. Вакуумная протяженная рабочая камера на верхней части станины.
4. Ловушка паров воды (при необходимости).
5. Вакуумные трубы и запорная арматура вакуумной системы.
6. Механический вакуумный насос, закрепленный на станине.
7. Блок питания нагревателя рабочей камеры с термодатчиком.
8. Блок измерения степени вакуума в вакуумной системе.

В качестве основных стандартных (унифицированных) комплектующих изделий для специальной технологической установки могут быть использованы следующие стандартные изделия:

1. Агрегат вакуумный механический типа АВЗ-20 или НВПР-16, обеспечивающий получение степени вакуума в рабочей камере порядка 10⁻² мм.рт.ст. при скорости откачки до 15-20 л/с и возможностью откачки газа и водяного пара.

2. Вакуумметр типа 13ВТЗ-003 с датчиками ПМТ-6, вакуумметр ВИТ-3 с датчиками ПМТ и ПМИ, обеспечивающие измерение давлений газов в рабочей камере и трубопроводах в диапазоне 760- 10⁻⁶ мм.рт.ст.

3. Вакуумные затворы (например ЗВЭ-100, ЗВЭ-160), специальные вентили с Ду-16-25, клапаны типа КВУМ-25, вентили с ручным и электрическим приводом ВРП-25 или клапаны с пневмоприводом типа КПУ.

4. Для изготовления узлов вакуумной части установки необходимо использование таких вакуумных материалов как нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, чистая медь М-1, фторопласт Ф-4, вакуумная резина ИРП-2043, кварц, молибден МЧ, керамика 22ХС, имеющих сравнительно низкое газовыделение в вакууме.

Проектные расчеты вакуумной системы лабораторной и промышленной установки вакуумной проводились из расчета загрузки в один вакуумный цикл примерно 100 кг продуктов (примерно 10 кг для лабораторной установки). Для их обработки требуется вакуумная рабочая камера диаметром около 600 мм и длиной порядка 1500 мм из нержавеющей стали. Объем рабочей вакуумной камеры не превысит 0,4-0,5 м³ (для лабораторной установки не более 0,05 м³). Основы расчетов приведены в [1-10].

Общая площадь внутренней части рабочей камеры, внутренней оснастки и частей всей вакуумной системы установки может составить около 4,0 м² (для лабораторной установки около 0,5 м²). Площадь прокладок не превышает 0,01- 0,1 м².

Исходя из известных данных по адсорбции и газовыделению в вакууме различных материалов удельный поток газов от стальных частей (12Х18Н10Т) установки (Q_1) может составить примерно $2 \cdot 10^{-5}$ - $1,7 \cdot 10^{-4}$ м³Па/(с м²). Общий поток газа от камеры промышленной установки не превысит значений порядка 10^{-3} м³Па/с. Для лабораторной установки эти значения будут в 4 раза ниже.

От обрабатываемых продуктов при их обработке исходя из их площади около 10 м² ожидается появление потока газов и паров ($Q_2 + H_2O$) не менее $1,5 \cdot 10^{-2}$ м³Па/с (для лабораторной установки не менее 10^{-3} м³Па/с). Следует учесть, что со временем суммарный поток газа и паров воды будет уменьшаться с увеличением длительности откачки вакуумной системы.

Наибольший вклад в поток газов и паров вакуумной системы могут вносить испарения от обрабатываемых продуктов. Оценить вклад этой последней компоненты количественно не представляется возможным. Оценка потока паров воды зависит от скорости ее испарения.

Согласно расчетов эффективная скорость откачки S_0 механического насоса с производительностью 15-20 л/с учитывая проводимость вакуумопроводов, всей запорной арматуры и ловушки составит примерно 13-16 л/с.

Исходя из равенства потоков потока паров (газов) и произведения эффективной скорости откачки и давления p на входе насоса можно оценить реальное давление в вакуумной системе [1-3]:

$$Q_2 + Q_1 + Q_3 = pS_0 \quad (4.1)$$

По проведенным оценкам давление в вакуумной камере (p) составит: при откачке вакуумной рабочей камеры без нагрева примерно 1-3 мм.рт.ст., при нагреве камеры и откачке примерно 30 мм.рт.ст.

Термическая обработка материалов в условиях пониженного давления требует создания специального вакуумного оборудования.

Установки промышленного типа со сравнительно большими герметичными вакуумными камерами должны иметь внутренний объем до 1-2 кубометров, их размеры будут определяться оптимальными техническими возможностями производства. Так целесообразно использование цилиндрических камер с фланцевыми соединениями, диаметр которых не превышает 1000-1500 мм. Длина камер для удобства их использования (доступа к внутренним частям) не должна превышать 3-4 м. Таким образом максимальный рабочий объем герметичных камер вообще не может превышать 10-12 м³.

Материал рабочих камер как правило является листовым прокатом из металлов, обеспечивающих высоко герметичные и прочные сварные швы (углеродистые и легированные стали). Алюминий и его сплавы также подходят для решения задач обезвоживания. Возможно использование двухслойных листовых сталей, например Ст-3 и X18H10T или X17H13M2T, а также сталей 1X21H5T, OX21H6M2T и других. Как правило используются листы толщиной не менее 2-6 мм (масса 16-47 кг 1 м²)

Цилиндрические обечайки для вакуумного приборостроения, получаемые путем вальцовки и соединения стыков сваркой или пайкой, всегда имеют самое минимальное количество швов. При конструировании камер независимо от выбранного материала рекомендуется придерживаться размеров обечайки по среднему диаметру 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200 мм или использовать трубы с аналогичным наружным диаметром.

Широкое распространение для цилиндрических обечаек получили эллиптические днища, штампованные из проката как наиболее рациональные для восприятия внешнего давления. При этом величина прогиба днища должна быть не менее 0,2 от диаметра (D) днища (рекомендуется около 0,25 от D). Плоские днища необходимо изготавливать из листов значительной толщины (обычно в 3-5 раз толще прогнутых). Для снижения их толщины можно использовать ребра жесткости, приваренные прерывистым двусторонним швом (для диаметров до 1,5 м не менее 6 ребер). Рациональными являются также обечайки сферической формы.

Крышки вакуум-камер, как и днища, могут быть плоскими, эллиптическими и сферическими. Крышки (в большинстве круглые) содержат точеный фланец, приваренный к крышке. На крышках должны быть быстродействующие прижимные устройства для создания начального давления до 0,5 Мн/м². После откачки сила атмосферного давления передается на уплотняющую прокладку, чем обеспечивается окончательное уплотнение. Крышка диаметром 2 м создает давящее усилие около 30 тонн.

Расчет на прочность цилиндрической вакуумной камеры сводится прежде всего к определению толщины стенок (тонкостенной оболочки для которой толщина стенки s мала по сравнению с радиусом кривизны) по условию s/D меньше 0,04. Внешняя распределенная нагрузка P_н может достигать значений 0,1 Мн/м² (без учета какого-либо дополнительного давления). С учетом запаса прочности для легированной стали допустимое напряжение, определяемое пределом прочности, длительной прочности, пределом текучести и ползучести зависит от ряда факторов, в частности температуры.

Расчетная толщина стенки камеры s может быть оценена по следующей формуле:

$$s=1,25D(P_n l/ED)^{0,4+c} \quad (4.2),$$

где E- модуль упругости материала, Мн/м², l- расчетная длина обечайки, м, c- добавка на минусовой допуск толщины листа, м. Модуль упругости сталей зависит

от рабочей температуры и для углеродных и легированных сталей меняется от $2 \cdot 10^5$ до $1,5 \cdot 10^5$ Мн/м².

Для стальных цилиндрических камер толщина стенок может быть выбрана в зависимости от диаметра исходя из расчетов. Для диаметров 400-500 мм толщина стенок не менее 2,5 мм, для диаметров 600-700 мм- 4,0-4,5 мм. Для повышенных внешних давлений (например при погружении в воду или использовании охлаждающей рубашки) с давлением до 4 атмосфер толщина стенки должна быть увеличена примерно на 30 %.

При изготовлении камер следует выбирать соотношение l/D возможно меньше, при достижении l/D больше 5 целесообразно выполнять обечайку с ребрами жесткости (кольцами снаружи или внутри). Соединение колец с обечайкой возможно сплошным или прерывистым швом (пайкой или сваркой).

Расчетная толщина эллиптической стенки (s) днища с наружным давлением P_H определяется по формуле:

$$s = D^2 P_H / 7,6 f k_1 k h + c \quad (4.3),$$

где h - высота выпуклой стенки днища, k_1 - коэффициент для глухих днищ = 0,74, k - безразмерный коэффициент равный 1 для днищ без отверстий, f составляет для стали примерно $185 \cdot 10^6$ н/м², c - прибавка к толщине, выбранная по сортаменту листа.

Рекомендуется принимать толщину стенки днища s из углеродистых и высоколегированных сталей как правило на 1-2 мм толще сопрягаемой с ней обечайки.

Расчет толщины плоского днища (фланца без ребер жесткости), работающего под вакуумом довольно сложен. Для фланца без отверстий толщину можно оценить по формуле типа:

$$s = 0,93 s_0 (0,19 P_H D^2 / f k s_0 - 1)^{0,5} + c \quad (4.4),$$

где s_0 - толщина обечайки, D - диаметр фланца, P_H - внешнее давление, f - предел прочности, k - коэффициент равный 0,85, c - прибавка к толщине листов по их сортаменту.

Плоские днища и фланцы целесообразно укреплять ребрами жесткости, особенно при диаметрах свыше 500-600 мм. Как показали наши исследования при размерах днища (фланца) порядка 1,0-1,1 м в диаметре и толщине плоского днища 10-12 мм прогиб без ребер жесткости может достигать значений 30-40 мм. Плоские днища и фланцы целесообразно использовать для контейнеров (камер) диаметром до 500 мм

Вакуумная рабочая камера, в которую загружаются обрабатываемые продукты, состоит из сваренной цилиндрической обечайки толщиной 3,5-5,0 мм с приваренными фланцами диаметром до 500 мм. С одной стороны рабочая камера имеет переходной фланец для соединения с вакуумным затвором, с другой стороны имеется открывающаяся дверца с ручкой для уплотнения фланца.

Скоростью суммарного газовыделения можно пренебречь (принять постоянной), учитывая, что камера постоянно контактирует с атмосферным воздухом, а время процесса откачки не превысит 10 минут для реального процесса. Учитывая общую площадь внутренней части камеры (около $2,5 \text{ м}^2$) можно считать газовыделение в вакуумную систему незначительным (не более $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$), что даже при использовании обычного механического вакуумного насоса обеспечит получение степени вакуума порядка 10^{-1} Па .

Рассматривая вакуумную схему типа рабочая камера- вентиль- трубопровод с датчиками вакуума- клапан- вакуумный насос следует учесть наличие в камере продуктов (например фруктов, которые создают соответствующее газовыделение в рабочем объеме) При работе вакуумного насоса происходит постепенное уменьшение давления в рабочем объеме камеры и режим течения газа меняется от турбулентного (возникающего в первый момент) к ламинарному (вязкостному) и молекулярному режиму. Вязкостный режим течения газа наиболее характерен для рассматриваемого случая и возникает при откачке воздуха в случае, когда поток воздуха Q не превышает значений $1,5 \cdot 10^2 d$ (л мм.рт.ст/с), где d - диаметр трубопровода в сантиметрах.

Поток проходящего газа и пара одинаков в любом сечении вакуумной системы и определяется произведением давления в данном сечении (p) и проходящего объема газа в единицу времени (S). При наличии трубопроводов, вентилях, диафрагм потоку откачиваемого газа (пара) оказывается сопротивление

и быстрота откачки снижается. В конечном итоге проводимость (пропускная способность) вентилей, трубопроводов и других элементов (U) оказывается связанной с быстротой откачки объекта S_o и производительностью насоса S_n соотношением:

$$S_o = S_n U / (S_n + U) \quad (4.5)$$

Для трубопроводов круглого постоянного сечения пропускная способность U (л/с) при молекулярном режиме течения газа может быть оценена по формуле:

$$U = 3,8d^3(T/M)^{0,5}L^{-1} \quad (4.6)$$

где d - диаметр трубопровода, см, L - длина трубопровода, см, T и M - температура и молекулярная масса откачиваемого газа. Для воздуха численный коэффициент при 20 °С составляет 12,1.

Для вязкостного режима течения газа (воздуха) пропускная способность достаточно длинного трубопровода с давлениями на концах p_1 и p_2 может быть оценена по формуле, вытекающей из уравнения Пуазейля.

$$U = 182d^4(p_1 + p_2) / 2L \quad (4.7)$$

Для турбулентного режима течения газа, возникающего в первоначальный момент откачки камеры, пропускная способность длинного трубопровода (U) может быть оценена по формуле Блазиуса, которая для воздуха выглядит следующим образом:

$$U = 94d^{19/7}(p_1 + p_2)^{4/7} / L^{4/7}(p_1 - p_2)^{3/7} \quad (4.8)$$

При наличии изгибов (колен) в трубопроводе его "эффективная" длина несколько увеличивается, что может быть учтено путем прибавки к исходной длине трубопровода L величины $1,33dn$ где n -число изгибов трубопровода или колен вентиля. Следует учесть также, что при откачке различных газов пропускная

способность по отношению к воздуху меняется. Так для водорода $U/U_{\text{возд.}}$ составляет 3,78, для водяного пара 1,26, для аргона 0,85, для углекислого газа 0,81.

Расчеты показывают, что пропускная способность U круглых трубопроводов длиной 1,0 м по воздуху при нормальных температурах и молекулярном режиме течения газа составит:

-для диаметра трубопровода 0,5 см- примерно 0,02 л/с, для вязкостного режима течения газа при давлении 1 мм.рт.ст. пропускная способность достигает 0,3 л/с,

-для диаметра трубопровода 3,0 см примерно 4 л/с, при вязкостном режиме около 170 л/с,

-для диаметра трубопровода 6,0 см- примерно 30 л/с, при вязкостном режиме- до 2000 л/с.

При откачке вакуумного объема V при турбулентном режиме в начале откачки пропускная способность системы трубопроводов и вентиляей обычно гораздо больше быстроты откачки насоса и можно принять скорость откачки камеры равной скорости откачки насоса. В этом случае длительность откачки t вакуумного объема V составит:

$$t=2,3V/xS_n \log p_1/p_2 \quad (4.9)$$

где V -объем камеры, x - показатель политропы=1,4, S_n - скорость откачки насоса.

При вязкостном режиме откачки камеры расчетные формулы достаточно громоздки, однако конечные расчеты показывают, что для этого режима время откачки вакуумного объема $1,0 \text{ м}^3$ через трубопровод диаметром 6 см длиной 2,5 м (или длиной около 2 м с двумя вентилями) от атмосферного давления до 10^{-1} мм.рт.ст составит:

-при использовании насоса со скоростью около 20 л/с- примерно 400 с.,

-при использовании насоса со скоростью около 90 л/с- примерно 80 с.

При откачке вакуумного объема $V=70$ литров, заполненного воздухом через трубопровод диаметром 3 см и длиной 2,5 м насосом со скоростью откачки около 5 л/с время достижения степени вакуума около 10^{-1} мм.рт.ст составит около 100 с.

При использовании трубопровода диаметром около 1 см это время увеличится до 280 с.

В реальном случае откачки вакуумной камеры или контейнера, заполненного веществами, постоянно выделяющими пары воды, ртуть и газы время откачки объема от начального давления p_1 (например 10^5 Па) до конечного давления p_2 реально может быть оценено по формуле:

$$t=2,3V/S_o \log(p_1-p_o)/(p_2-p_o) \quad (4.10)$$

где V - объем камеры, S_o - эффективная скорость откачки, p_1 и p_2 - начальное и конечное давление в камере, p_o - наименьшее давление, которое может быть достигнуто в вакуумной системе из-за постоянного газовыделения (парообразования). Это давление (p_o) может определяться суммой всех поступающих паров и газов в вакуумной системе.

Оценка возникающего давления для продуктов с очень большим содержанием влаги может быть проведена по давлению насыщающих паров воды, которое сильно зависит от температуры. Как известно из справочных данных для воды давление и плотность водяного пара однозначно определяются температурой. Давление насыщенного пара при температуре около 0°C составляет 4,58 мм.рт.ст., при 20°C достигает 17,54 мм.рт.ст., а при 50°C превышает 90 мм.рт.ст.

Для улавливания паров воды из продуктов возможно использование охлаждаемых ловушек. Известные варианты конструкции ловушек как правило сводятся к параллельным уголковым (90°) элементам, расположенным в герметичном корпусе. Расположение уголков, их количество и плотность может быть различным, как и методы охлаждения элементов всей конструкции. При охлаждении ловушек могут быть использованы самые различные хладагенты, что показывает таблица 4.1.

Давление паров при различных температурах хладагентов ловушек

Вид хладагента ловушки	Температура °С	Давление CO ₂ мм.рт.ст	Давление H ₂ O мм.рт.ст	Давление Hg мм.рт.ст
Проточная вода	+15	-	17,5	10 ⁻³
NaCl со льдом	-18	-	0,8	6 · 10 ⁻⁴
Фреон-22	-35	-	0,3	7 · 10 ⁻⁶
Углекислота с эфиром	-78	670	5 · 10 ⁻⁴	10 ⁻¹⁰
Жидкий азот	-196	10 ⁻⁸	10 ⁻²¹	10 ⁻²²

Видно, что для эффективной работы ловушек вполне достаточны температуры, которые дает фреон. Охлаждаемые ловушки обеспечивают достаточно надежную изоляцию от попадания паров воды в вакуумную систему и на вход насосов, однако требуют постоянного охлаждения и контроля.

Электрическая часть установки вакуумного обезвоживания содержит силовую часть и блок управления. Питание установки осуществляется от трехфазной сети переменного тока 220 В 50 Гц. Ориентировочное потребление электроэнергии проектируемой промышленной установки от трехфазной сети составляет: в режиме вакуумного цикла- до 1,5 кВА, в режиме нагрева рабочей камеры- до 6 кВА. Для лабораторной установки соответствующие значения не превышают 1,0 кВА и 2,5 кВА.

Силовая и часть установки включает в себя следующие основные изделия (блоки):

- четырехпроводный кабель сечением до 5 мм² длиной не менее 6 м с вилкой,
- колодки для крепления, распределительные колодки и автомат включения,
- индикаторы напряжения в фазе, реле, предохранители, монтажные провода,
- панель с пускателями типа ПМЭ (на 5-10 А), ПЭ для подачи питания (сети) к узлам установки, в частности, нагревателям, панелям управления и блокам,
- стабилизированный блок питания реле и индикаторов (24 В), автотрансформатор типа РНО или блок управления тиристорами (БУТ),
- блок измерения вакуума в рабочей камере и магистралях типа 13ВТ-3-001,
- блок измерения температуры (ограничения температуры) в вакуумной рабочей камере в интервале значений 20-100 °С,

- панель управления вакуумной системой, нагревом и разрядом в вакуумной камере с индикаторами и измерительными приборами.

Управление установкой осуществляется за счет нажатия кнопок, переключателей и вращения регуляторов на лицевой панели в ручном режиме. Состояние системы и ее отдельных узлов (включение блоков, клапанов, приводов) наблюдается на панели управления установкой

Расчеты нагрева рабочей камеры, представляющей собой цилиндр из стали 12Х18Н10Т с двумя фланцами сводится к оценке рассеяния выделяющегося тепла при нагреве цилиндра заданной формы (площади). Общий приток тепла за счет нагрева камеры спиралями из нихрома в керамических изоляторах или нагрева трубчатыми электронагревателями (ТЭНами) определяется параметрами электрической цепи и регулируется за счет изменения эффективного напряжения (U) на нагревателях с сопротивлением R.

Выделяющееся Джоулево тепло рассеивается в первую очередь за счет излучения от нагретых частей камеры и теплопроводности камеры, находящейся в тепловом контакте с охлажденными частями установки. Часть мощности также уносят нагретые пары и газы в вакуумной системе и конвекционные потоки окружающего внешнюю часть камеры атмосферного воздуха. Поток тепла $Q_{\text{изл}}$, рассеиваемый за счет теплового излучения стенок камеры может быть оценен по формуле:

$$Q_{\text{изл}} = \epsilon \epsilon_0 A [(T/100)^4 - (T_0/100)^4] \quad (4.11)$$

где ϵ - приведенная степень черноты порядка 1, зависящая от материала, его поверхности, ϵ_0 - коэффициент лучеиспускания для абсолютно черного тела равный $4,9 \text{ ккал/м}^2 \text{ ч К}^4$, A- поверхность нагретых частей камеры, м^2 , T и T_0 - температуры камеры и окружающих объектов, К. Поток тепла $Q_{\text{теп}}$ за счет теплопроводности материалов камеры, опор, охлаждаемых фланцев и других элементов конструкции определяется суммой этих потерь по известной формуле:

$$Q_{\text{теп}} = kA(T - T_0)/L \quad (4.12)$$

где k - коэффициент теплопроводности, ккал/м •ч К, A - площадь поперечного сечения трубопроводов и опор, м², L - длина трубопроводов и опор, м, T и T_0 - температура камеры и холодных частей опор установки, К.

Как показывают расчеты максимальное количество выделяемой на рабочей камере энергии зависит от необходимой рабочей температуры и размеров (площади) камеры. В таблице 4.2 приведены расчетные значения мощности, необходимой для поддержания температур 100-200 °С для лабораторной ($A=1$ м²) и промышленной ($A=2,5$ м²) установок.

Таблица 4.2

Расчетная мощность нагревателя рабочей камеры установки

Вид установки и общая площадь рабочей камеры	Мощность, кВА $T=50$ °С	Мощность, кВА $T=100$ °С	Мощность, кВА $T=150$ °С
Лабораторная $A= 1,0$ м ²	0,32	0,65	1,37
Промышленная, $A=$ $2,5$ м ²	0,80	1,62	3,42

Особенности процесса вакуумной сушки отжимок определяются механизмом перемещения влаги внутри материала и в вакуумной камере, то есть характером влагопереноса. При неравномерном распределении влаги внутри большого объема отжимок происходит ее движение в направлении пониженной влажности. Влага перемещается внутри массы отжимок под воздействием перепада влажности (градиента влагосодержания) по объему материала. Движение влаги также будет происходить, если существует перепад температуры (градиент температуры) по объему отжимок. Это движение будет происходить в сторону пониженной температуры. Чем сильнее прогрев, тем выше теплопроводность за счет снижения вязкости влаги в капиллярах.

В практике сушки под воздействием перепада температур возникает интенсивный поток влаги от более горячих зон к более холодным даже в тех

случаях, когда холодная зона оказывается более влажной. Если во внутренних слоях отжимок имеется избыточное по сравнению с внешней средой давление, то под его воздействием влага в виде направленного потока пара движется в сторону более низкого давления. Следовательно, одна из причин движения влаги - перепад давления пара по объему (градиент давления).

Обобщенное уравнение при влагопереноса имеет вид типа:

$$i = \alpha' \rho_0 (du/dx) - \alpha' \rho_0 \delta (dt/dx) - b(dp/dx), \quad (4.13)$$

где i — плотность потока влаги; α' — коэффициент влагопроводности; ρ_0 — плотность вещества в абсолютно сухом состоянии; (du/dx) — градиент влагосодержания;

δ — термоградиентный коэффициент; (dt/dx) — градиент температуры; b — коэффициент молярного переноса; (dp/dx) — коэффициент внутреннего избыточного по сравнению с внешней средой давления.

В условиях обычной конвективной сушки роль градиентов температуры и давления мала. Решающее значение здесь имеют коэффициент влагопроводности отжимок и градиент влагосодержания, возникающий при перепаде влажности на поверхности и внутри материала. Уравнение влагопереноса для конвективной сушки имеет вид: $i = \alpha' \rho du/dx$. Увеличение перепада влажности на поверхности и внутри материала в конвективных сушильных камерах с целью ускорения процесса сушки увеличивает внутренние напряжения в обрабатываемом материале.

В вакуумных сушильных камерах используются градиент давления dp/dx и температурный градиент dt/dx . Численные значения температурного градиента невысоки, основные функции выполняет градиент давления dp/dx и этим объясняется уменьшение времени сушки в 3-4 раза в вакуумных сушилках относительно конвективных сушильных камер.

Наиболее перспективным с точки зрения интенсификации процесса сушки является молярный влагоперенос под действием избыточного давления. При интенсивном нагреве в высокотемпературном процессе, температура высушиваемого материала достигает температуры выше точки кипения воды при данном давлении и температуре окружающей древесину среды. Свободная влага внутри клеток и в межклеточных пространствах вскипает. При этом давление пара

во внутренних зонах становится выше давления пара, находящегося внутри сушильной камеры, образуется перепад давлений, который гонит влагу к поверхности. За счет частичного испарения влаги температура поверхности снижается ниже температуры ее кипения при данном давлении. Поле выкипания всей свободной влаги температура материала начинает повышаться, стремясь к температуре среды. В этот период основной причиной движения влаги является перепад влажности по толщине материала.

4.2. Расчеты параметров рабочей камеры установки и процессов газовой выделения при термической обработке изделий

Термическая обработка ртутьсодержащих материалов в условиях пониженного давления требует создания специального вакуумного оборудования и удобных устройств, предназначенных для демеркуризации, безопасного хранения и перевозки отходов. В зависимости от решаемых задач возможны различные варианты создания таких установок, в частности большие (стационарные) установки непрерывного действия и установки небольших габаритов (оптимальных размеров) циклического действия, методы расчетов которых достаточно хорошо известны [47-56].

Установки промышленного типа со сравнительно большими герметичными вакуумными камерами должны иметь внутренний объем не менее нескольких кубометров, их размеры будут определяться оптимальными техническими возможностями производства. Так целесообразно использование цилиндрических камер с фланцевыми соединениями, диаметр которых не превышает 1000-2000 мм (до 2,2 м). Длина камер для удобства их использования (доступа к внутренним частям) не должна превышать 3-4 м. Таким образом максимальный рабочий объем герметичных камер вообще не может превышать 10-12 м³.

Материал рабочих камер как правило является листовым прокатом из металлов, обеспечивающих высоко герметичные и прочные сварные швы (углеродистые и легированные стали). Алюминий и его сплавы принципиально не подходят для решения задач демеркуризации каких-либо изделий. Для установок с высоким вакуумом требуется нержавеющая сталь, обеспечивающая получение

степени вакуума до 10^{-6} Па. Возможно использование двухслойных листовых сталей, например Ст-3 и Х18Н10Т или 20К и Х17Н13М2Т, а также высоколегированных сталей 1Х21Н5Т, ОХ21Н6М2Т и других. Как правило используются листы толщиной не менее 2-6 мм (масса 16-47 кг 1 м^2)

Цилиндрические обечайки для вакуумного приборостроения, получаемые путем вальцовки и соединения стыков сваркой или пайкой, всегда имеют самое минимальное количество швов. При конструировании камер независимо от выбранного материала рекомендуется придерживаться размеров обечайки по среднему диаметру 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200 мм или использовать трубы с аналогичным наружным диаметром.

Широкое распространение для цилиндрических обечаек получили эллиптические днища, штампованные из проката как наиболее рациональные для восприятия внешнего давления. При этом величина прогиба днища должна быть не менее 0,2 от диаметра (D) днища (рекомендуется около 0,25 от D). Плоские днища необходимо изготавливать из листов значительной толщины (обычно в 3-5 раз толще прогнутых). Для снижения их толщины можно использовать ребра жесткости, приваренные прерывистым двусторонним швом (для диаметров до 1,5 м не менее 6 ребер). Рациональными являются также обечайки сферической формы.

Крышки вакуум-камер, как и днища, могут быть плоскими, эллиптическими и сферическими. Крышки (в большинстве круглые) содержат точеный фланец, приваренный к крышке. На крышках должны быть быстродействующие прижимные устройства (накидные болты, барашковые гайки, кулачковые зажимы) для создания начального давления до $0,5 \text{ Мн/м}^2$. После откачки сила атмосферного давления передается на уплотняющую прокладку, чем обеспечивается окончательное уплотнение. Крышка диаметром 2 м создает давящее усилие около 30 тонн. Для крышки диаметром около 500 мм в диаметре соответствующее усилие составит около 2 тонн.

Расчет на прочность цилиндрической вакуумной камеры сводится, прежде всего к определению толщины стенок (тонкостенной оболочки для которой толщина стенки s мала по сравнению с радиусом кривизны) по условию s/D меньше 0,04. Внешняя распределенная нагрузка P_n может достигать значений 0,1

Мн/м² (без учета какого-либо дополнительного давления). С учетом запаса прочности для легированной стали допустимое напряжение, определяемое пределом прочности, длительной прочности, пределом текучести и ползучести зависит от ряда факторов, в частности температуры.

Расчетная толщина стенки камеры s может быть оценена по следующей формуле:

$$s=1,25D(P_n l/ED)^{0,4}+c \quad (4.14),$$

где E - модуль упругости материала, Мн/м², l - расчетная длина обечайки, м, c - добавка на минусовой допуск толщины листа, м. Модуль упругости сталей зависит от рабочей температуры и для углеродных и легированных сталей меняется от $2 \cdot 10^5$ до $1,5 \cdot 10^5$ Мн/м².

Для стальных цилиндрических камер толщина стенок может быть выбрана в зависимости от диаметра исходя из расчетов. Для диаметров 400-500 мм толщина стенок не менее 2,5 мм, для диаметров 600-700 мм- 4,0-4,5 мм. Для повышенных внешних давлений (например при погружении в воду или использовании охлаждающей рубашки) с давлением до 4 атмосфер толщина стенки должна быть увеличена примерно на 30 %.

При изготовлении камер следует выбирать соотношение l/D возможно меньше, при достижении l/D больше 5 целесообразно выполнять обечайку с ребрами жесткости (кольцами снаружи или внутри). Соединение колец с обечайкой возможно сплошным или прерывистым швом (пайкой или сваркой).

Расчетная толщина эллиптической стенки (s) днища с наружным давлением P_n определяется по формуле:

$$s=D^2 P_n/7,6 f k_1 k h + c \quad (4.15),$$

где h - высота выпуклой стенки днища, k_1 - коэффициент для глухих днищ = 0,74, k - безразмерный коэффициент равный 1 для днищ без отверстий, f составляет для стали примерно $185 \cdot 10^6$ н/м², c - прибавка к толщине, выбранная по сортаменту листа.

Рекомендуется принимать толщину стенки днища s из углеродистых и высоколегированных сталей как правило на 1-2 мм толще сопрягаемой с ней обечайки.

Расчет толщины плоского днища (фланца без ребер жесткости), работающего под вакуумом довольно сложен. Для фланца без отверстий толщину можно оценить по формуле типа:

$$s=0,93s_0(0,19P_nD^2/fks_0-1)^{0,5} +c \quad (4.16),$$

где s_0 - толщина обечайки, D - диаметр фланца, P_n - внешнее давление, f - предел прочности, k - коэффициент равный 0,85, c - прибавка к толщине листов по их сортаменту.

Плоские днища и фланцы целесообразно укреплять ребрами жесткости, особенно при диаметрах свыше 500-600 мм. Как показали наши исследования при размерах днища (фланца) порядка 1,0-1,1 м в диаметре и толщине плоского днища 10-12 мм прогиб без ребер жесткости может достигать значений 30-40 мм. Плоские днища и фланцы целесообразно использовать для контейнеров (камер) диаметром до 500 мм. Для камер с диаметрами обечайки выше 1,4 м плоские фланцы однозначно требуют наличие ребер жесткости, например радиальных ребер.

При использовании смотровых окон из стекла в рабочих камерах для наблюдения за изделиями необходимо использование стекол в виде круглых пластин. Толщина стекол (d) в зависимости от диаметра свободной поверхности (D) выбирается в пределах 0,15-0,20 от D . При этих условиях пластина из стекла надежно выдерживает атмосферное давление, например подходят стекла 58x10, 88x15, 150x15 мм.

Конструкция вакуумной рабочей камеры для демеркуризации стеклянных изделий типа люминесцентных ламп приведена на рисунке 4.1. Вакуумная рабочая камера, в которую загружаются ртутьсодержащие отходы, состоит из сваренной цилиндрической обечайки толщиной 3,5-5,0 мм с приваренными фланцами диаметром до 500 мм. В камеру вварены также небольшие фланцы (ввод движения в вакуум, электрические вводы). С одной стороны рабочая камера имеет переходной фланец для соединения с вакуумным затвором, с другой стороны

имеется открывающаяся дверца со смотровым окном и ручкой для уплотнения фланца.

В реальной вакуумной рабочей камере, в частности проектируемой камере из стали 12Х18Н10Т, давление будет определяться потоком газов, поступающих в вакуумную систему с учетом характера изменения процесса газовой выделенной. Поток со стенок камеры, обращенных в вакуумную полость пропорционален площади и скорости удельного газовой выделенной с поверхностей стенок (газовыделение всех элементов).

Скорость суммарного газовой выделенной можно принять постоянной, учитывая, что камера постоянно контактирует с атмосферным воздухом, а время процесса откачки не превысит 10-30 минут для реального процесса. Для нержавеющей стали скорость удельного газовой выделенной с внутренних поверхностей составляет $2 \cdot 10^{-5}$ - $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \text{ Па/м}^2 \text{ с}$ ($1,5 \cdot 10^{-8}$ - $1,3 \cdot 10^{-7} \text{ л мм.рт.ст./см}^2 \text{ с}$) при изменении времени откачки от 1 до 5 часов и снижается в сотни раз при нагреве до $400 \text{ }^\circ\text{C}$.

Учитывая общую площадь внутренней части камеры (около $2,5 \text{ м}^2$) можно считать газовой выделенной в вакуумную систему незначительным (не более $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$), что даже при использовании обычного механического вакуумного насоса обеспечит получение степени вакуума порядка 10^{-1} Па .

4.3. Вакуумный пост установки

Выбранные схемы стационарной установки с камерой большой емкости ($0,5 \text{ м}^3$) и небольшой лабораторной установки с прогреваемой рабочей камерой объемом до 50 л принципиально одинаковы и отличаются только значениями производительности насосов и размерами трубопроводов.

В качестве откачных средств успешно могут быть использованы механические вакуумные агрегаты, например вакуумные агрегаты типа АВЗ-20, НВПР-16Д, 2НВП-5ДМ и другие механические насосы. Целесообразно использование вакуумопроводов круглого сечения (труб из нержавеющей стали диаметром 10-63 мм), а также запорной аппаратуры в виде стандартных вентилях ВРП, клапанов КВУМ, КПВ, КПЭ, натекателей НВ и другой стандартной коммутационной (запорной) и регулирующей аппаратуры.

Рассматривая вакуумную схему типа рабочая камера- вентиль- трубопровод с датчиками вакуума- клапан- вакуумный насос следует учесть наличие в камере продуктов (например фруктов, которые создают соответствующее газовыделение в рабочем объеме) При работе вакуумного насоса происходит постепенное уменьшение давления в рабочем объеме камеры и режим течения газа меняется от турбулентного (возникающего в первый момент) к ламинарному (вязкостному) и молекулярному режиму. Вязкостный режим течения газа наиболее характерен для рассматриваемого случая и возникает при откачке воздуха в случае, когда поток воздуха Q не превышает значений $1,5 \cdot 10^2 d$ (л мм.рт.ст/с), где d - диаметр трубопровода в сантиметрах.

Поток проходящего газа одинаков в любом сечении вакуумной системы и определяется произведением давления в данном сечении (p) и проходящего объема газа в единицу времени (S). При наличии трубопроводов, вентилях, диафрагм потоку откачиваемого газа (пара) оказывается сопротивление и быстрота откачки снижается. В конечном итоге проводимость (пропускная способность) вентилях, трубопроводов и других элементов (U) оказывается связанной с быстротой откачки объекта S_o и производительностью насоса S_n соотношением:

$$S_o = S_n U / (S_n + U) \quad (4.17)$$

Для трубопроводов круглого постоянного сечения пропускная способность U (л/с) при молекулярном режиме течения газа может быть оценена по формуле:

$$U = 3,8 d^3 (T/M)^{0,5} L^{-1} \quad (4.18)$$

где d - диаметр трубопровода, см, L - длина трубопровода, см, T и M - температура и молекулярная масса откачиваемого газа. Для воздуха численный коэффициент при 20°C составляет 12,1.

Для вязкостного режима течения газа (воздуха) пропускная способность достаточно длинного трубопровода с давлениями на концах p_1 и p_2 может быть оценена по формуле, вытекающей из уравнения Пуазейля.

$$U = 182 d^4 (p_1 + p_2) / 2L \quad (4.19)$$

Для турбулентного режима течения газа, возникающего в первоначальный момент откачки камеры, пропускная способность длинного трубопровода (U) может быть оценена по формуле Блазиуса, которая для воздуха выглядит следующим образом:

$$U=94d^{19/7}(p_1+p_2)^{4/7}/L^{4/7}(p_1-p_2)^{3/7} \quad (4.20)$$

Пропускная способность U отверстий (диафрагм) площадью F , расположенных в трубопроводе любого сечения площадью F_0 в большинстве случаев может быть оценена по формуле:

$$U=3,64F(T/M)^{0,5}/(1-F/F_0) \quad (4.21)$$

для воздуха при нормальных условиях пропускная способность диафрагмы с площадью F достигает значений $11,6 F$, л/с.

Для коротких трубопроводов (вентилей, клапанов) пропускная способность может определяться выражением согласно формулы Клаузинга:

$$U=3,64KF(T/M)^{0,5} \quad (4.22)$$

где K - безразмерных коэффициент, являющийся функцией длины трубопровода к его диаметру, меняющийся от 1 (при $L/d=0$) до $4d/3L$ (при больших L/d). Для L/d равной 1 K составляет 0,51, для $L/d=2$ $K=0,36$.

Для вязкостного режима течения воздуха по короткому трубопроводу пропускная способность трубопровода определяется формулой типа:

$$U=91d^4(p_1+p_2)/L(1+0,038Q/L) \quad (4.23)$$

При наличии изгибов (колен) в трубопроводе его "эффективная" длина несколько увеличивается, что может быть учтено путем прибавки к исходной длине трубопровода L величины $1,33dn$ где n -число изгибов трубопровода или

колен вентиля. Следует учесть также, что при откачке различных газов пропускная способность по отношению к воздуху меняется. Так для водорода $U/U_{\text{возд.}}$ составляет 3,78, для водяного пара 1,26, для аргона 0,85, для углекислого газа 0,81, для ртути всего лишь 0,38.

Расчеты показывают, что пропускная способность U круглых трубопроводов длиной 1,0 м по воздуху при нормальных температурах и молекулярном режиме течения газа составит:

-для диаметра трубопровода 0,5 см- примерно 0,02 л/с, для вязкостного режима течения газа при давлении 1 мм.рт.ст. пропускная способность достигает 0,3 л/с,

-для диаметра трубопровода 3,0 см примерно 4 л/с, при вязкостном режиме около 170 л/с,

-для диаметра трубопровода 6,0 см- примерно 30 л/с, при вязкостном режиме- до 2000 л/с.

При откачке вакуумного объема V при турбулентном режиме в начале откачки пропускная способность системы трубопроводов и вентиляей обычно гораздо больше быстроты откачки насоса и можно принять скорость откачки камеры равной скорости откачки насоса. В этом случае длительность откачки t вакуумного объема V составит:

$$t=2,3V/xS_n \log p_1/p_2 \quad (4.24)$$

где V -объем камеры, x - показатель политропы=1,4, S_n - скорость откачки насоса.

При вязкостном режиме откачки камеры расчетные формулы достаточно громоздки, однако конечные расчеты показывают, что для этого режима время откачки вакуумного объема $1,0 \text{ м}^3$ через трубопровод диаметром 6 см длиной 2,5 м (или длиной около 2 м с двумя вентилями) от атмосферного давления до 10^{-1} мм.рт.ст составит:

-при использовании насоса со скоростью около 20 л/с- примерно 400 с.,

-при использовании насоса со скоростью около 90 л/с- примерно 80 с.

При откачке вакуумного объема $V=70$ литров, заполненного воздухом через трубопровод диаметром 3 см и длиной 2,5 м насосом со скоростью откачки около 5 л/с время достижения степени вакуума около 10^{-1} мм.рт.ст составит около 100 с. При использовании трубопровода диаметром около 1 см это время увеличится до 280 с.

В реальном случае откачки вакуумной камеры или контейнера, заполненного веществами, постоянно выделяющими пары воды, ртуть и газы время откачки объема от начального давления p_1 (например 10^5 Па) до конечного давления p_2 реально может быть оценено по формуле:

$$t=2,3V/S_o \log(p_1-p_o)/(p_2-p_o) \quad (4.25)$$

где V - объем камеры, S_o - эффективная скорость откачки, p_1 и p_2 - начальное и конечное давление в камере, p_o - наименьшее давление, которое может быть достигнуто в вакуумной системе из-за постоянного газовыделения (порообразования). Это давление (p_o) может определяться суммой всех поступающих паров и газов в вакуумной системе, то есть утечками вакуумной системы, газовыделением со стенок ламп, швов и прокладок, объемным газовыделением обрабатываемых изделий.

Учитывая, что газовыделение из таких материалов как сталь, стекло и других конструкционных материалов в вакууме относительно невелико и скорость их удельного газовыделения составляет $1,5 \cdot 10^{-4}$ - $1,5 \cdot 10^{-3}$ см³/см²час давление будет определяться в основном содержащимися в камере изделиями. Так как все изделия содержат ртуть и газы в своем составе, но отличаются их содержанием и наличием клеев и органических материалов (текстолит) расчет давления p_o в общем случае практически невозможен.

Оценка возникающего давления для изделий с очень большим содержанием влаги может быть проведена по давлению насыщающих паров воды, которое сильно зависит от температуры. Как известно из справочных данных для воды давление и плотность водяного пара однозначно определяются температурой. Давление насыщенного пара при температуре около 0 °С составляет 4,58 мм.рт.ст., при 20 °С достигает 17,54 мм.рт.ст., а при 50 °С превышает 90 мм.рт.ст. Это

говорит о необходимости предварительной сушки обрабатываемых изделий для удаления излишков влаги.

Удаление паров бензина, толуола и других растворителей из вакуумной камеры крайне нежелательно из-за возможности их попадания в вакуумный насос и смешивания с вакуумным маслом, в результате чего изменяется (уменьшается) вязкость вакуумного масла (ВМ-4, ВМ-6), что приводит к потере работоспособности насоса.

4.4. Электрическая схема установки и расчеты нагревателя

Электрическая схема установки демеркуризации изделий типа ламп и приборов с ртутным заполнением не имеет каких-либо особенностей и не требует изготовления сложных нестандартных изделий, узлов и электронных блоков питания.

Электрическая часть установки демеркуризации ламп содержит силовую часть и блок управления узлами установки. Питание установки осуществляется от трехфазной сети переменного тока 220 В 50 Гц. Допустимые отклонения по частоте переменного тока- 1 Гц, от напряжения питания- + 10 %, -10 %. Ориентировочное потребление электроэнергии проектируемой промышленной установки от трехфазной сети составляет: в режиме вакуумного цикла- до 1,5 кВА, в режиме нагрева рабочей камеры- до 6 кВА. Для лабораторной установки соответствующие значения не превышают 1,0 кВА и 3,5 кВА.

Силовая и электрическая часть установки включает в себя следующие основные изделия (блоки):

- силовой четырехпроводный кабель сечением до 5 мм² длиной не менее 6 м с вилкой и разъемом,
- колодки для крепления силового кабеля (2 шт.), распределительные колодки и автомат включения,
- индикаторы напряжения в фазе, реле, предохранители, монтажные провода,
- панель с пускателями типа ПМЭ (на 5-10 А), ПЭ для подачи питания (сети) к узлам установки, в частности двигателю насоса, клапанам, приводу, нагревателям, панелям управления и блокам,

- стабилизированный блок питания реле и индикаторов (24 В), автотрансформатор типа РНО или блок управления тиристорами (БУТ),
- блок измерения вакуума в рабочей камере и магистралях типа 13ВТ-3-001,
- блок подачи высокого напряжения в рабочую камеру (напряжение до 800 В при токах нагрузки до 1,0-1,5 А),
- блок измерения температуры (ограничения температуры) в вакуумной рабочей камере в интервале значений 50-250 °С,
- панель управления вакуумной системой, нагревом и разрядом в вакуумной камере с индикаторами и измерительными приборами.

Управление установкой (технологическим процессом демеркуризации изделий) осуществляется за счет нажатия кнопок, переключателей и вращения регуляторов на лицевой панели в ручном режиме. Состояние системы и ее отдельных узлов (включение блоков, клапанов, приводов) наблюдается на панели управления установкой. В случае аварийного отключения электроэнергии при проведении технологического процесса не происходит выброса паров ртути так как вакуумные вентили (клапаны) закрываются после снятия напряжения и в камере и ловушке остается пониженное давление.

Блок-схема электрической части установки для представлена на рисунке 5.4.

Расчеты нагрева рабочей камеры, представляющей собой цилиндр из стали 12Х18Н10Т с двумя фланцами сводится к оценке рассеяния выделяющегося тепла при нагреве цилиндра заданной формы (площади). Общий приток тепла за счет нагрева камеры спиралями из нихрома в керамических изоляторах или нагрева трубчатыми электронагревателями (ТЭНами) определяется параметрами электрической цепи и регулируется за счет изменения эффективного напряжения (U) на нагревателях с сопротивлением R.

Выделяющееся Джоулево тепло рассеивается в первую очередь за счет излучения от нагретых частей камеры и теплопроводности камеры, находящейся в тепловом контакте с охлажденными частями установки. Часть мощности также уносят нагретые пары и газы в вакуумной системе и конвекционные потоки окружающего внешнюю часть камеры атмосферного воздуха.

Поток тепла $Q_{\text{изл}}$, рассеиваемый за счет теплового излучения стенок камеры может быть оценен по формуле:

$$Q_{\text{изл}} = c c_0 A [(T/100)^4 - (T_0/100)^4] \quad (4.26)$$

где c - приведенная степень черноты порядка 1, зависящая от материала, его поверхности, c_0 - коэффициент лучеиспускания для абсолютно черного тела равный $4,9 \text{ ккал/м}^2 \text{ ч К}^4$, A - поверхность нагретых частей камеры, м^2 , T и T_0 - температуры камеры и окружающих объектов, К .

Поток тепла $Q_{\text{теп}}$ за счет теплопроводности материалов камеры, опор, охлаждаемых фланцев и других элементов конструкции определяется суммой этих потерь по известной формуле:

$$Q_{\text{теп}} = kA(T - T_0)/L \quad (4.27)$$

где k - коэффициент теплопроводности, ккал/м ч К , A - площадь поперечного сечения трубопроводов и опор, м^2 , L - длина трубопроводов и опор, м , T и T_0 - температура камеры и холодных частей опор установки, К .

Потоком тепла от паров в вакуумной камере можно пренебречь так как скрытая теплота парообразования не превышает десятков калорий на грамм, а количество испаряемого материала в целом не превышает несколько грамм. Оценить потоки тепла уносимого конвекцией воздуха сравнительно сложно, кроме того предполагается, что внешняя часть камеры будет покрыта экранами для защиты от конвекции.

Как показывают расчеты максимальное количество выделяемой на рабочей камере энергии зависит от необходимой рабочей температуры и размеров (площади) камеры. В таблице 4.3 приведены расчетные значения мощности, необходимой для поддержания температур $100\text{-}200 \text{ }^\circ\text{C}$ для лабораторной ($A=1 \text{ м}^2$) и промышленной ($A=2,5 \text{ м}^2$) установок.

Таблица 4.3

Расчетная мощность нагревателя рабочей камеры установки

Вид установки и общая площадь рабочей камеры	Мощность, кВА T=100 °C	Мощность, кВА T=150 °C	Мощность, кВА T=200 °C
Лабораторная A= 1,0 м ²	0,65	1,37	2,40
Промышленная, A= 2,5 м ²	1,62	3,42	6,02

4.4.1. Оценка нагрева стали в вакууме в зависимости от удельной мощности

Энергетическое воздействие на поверхность стали в конечном итоге приводит к нагреву поверхностного слоя за счет выделения энергии, пропорциональной количеству получаемой энергии, например от электронного потока. Если на подложку в высоком вакууме не действуют другие механизмы нагрева поверхности кроме электронного нагрева, можно оценить возможную температуру поверхности по балансу мощности.

С одной стороны в поверхностном слое не единицу обрабатываемой площади S выделяется энергия пропорциональная плотности тока j и потенциалу (энергии электронов) U . С другой стороны мощность E расходуется только на излучение, определяемое по закону Стефана-Больцмана $\xi\sigma(T^4 - T_0^4)$.

Следует учесть, что для объектов типа стальных дисков площадь излучения (энергетической светимости) увеличивается практически в 2 раза за счет тыльной стороны (без боковых сторон).

В реальности обрабатываемая подложка всегда закреплена на оснастке, которая представляет собой диск или другую конструкцию, контактирующую с тыльной стороной. Хороший тепловой контакт с тыльной стороной охлаждаемой оснастки может играть решающую роль в тепловом балансе. Реально с тыльной стороной пластин обычно контактирует относительно тонкая металлическая оснастка. В этом случае баланс мощности W в установившемся режиме определяется уравнением:

$$j_i U + Q = \xi \sigma (T^4 - T_0^4) + H(T - T_0), \quad (4.28)$$

где $j_i U$ -произведение плотности тока и потенциала (энергии электронов), Вт/м². ξ -безразмерный коэффициент около 0,7-1,0, σ -постоянная Стефана-Больцмана ($5,6710^{-8}$ Вт/м²К⁴), H - коэффициент теплопроводности материала, Вт/м²К, Q -дополнительная мощность от других источников нагрева поверхности, T и T_0 - соответственно конечная и начальная температура поверхности стали, К.

Как показывают расчеты, в случае плохого теплового контакта для коэффициента $\xi=0,8$, без дополнительной мощности, температура T зависит только от начальной температуры и выделяемой удельной мощности W . Расчетные значения установившейся температуры приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Температура поверхности при обработке электронным потоком

Условия при ионной обработке поверхности	Температура, °С для удельной мощности, Вт/см ²			
	0,01	0,1	1,0	10,0
$T_0=30$ °С, рассеяние W с одной/двух сторон	35/31	92/65	375/272	878/69 5
$T_0=400$ °С, рассеяние W с одной/двух сторон	400/400	405/403	520/513	886/70 6

Для случая низких температур удельная мощность порядка 10^{-2} Вт/см² играет существенную роль и увеличивает температуру поверхности объекта на 50-100 °С. В реальных условиях вакуумной обработки картина нагрева усложняется. За счет тепловых контактов с оснасткой температура снижается, однако за счет источников нагрева, например горячего экрана увеличивается.

На рис.4.1. приведены расчетные и экспериментальные зависимости установившейся температуры поверхности пластины от удельной мощности.

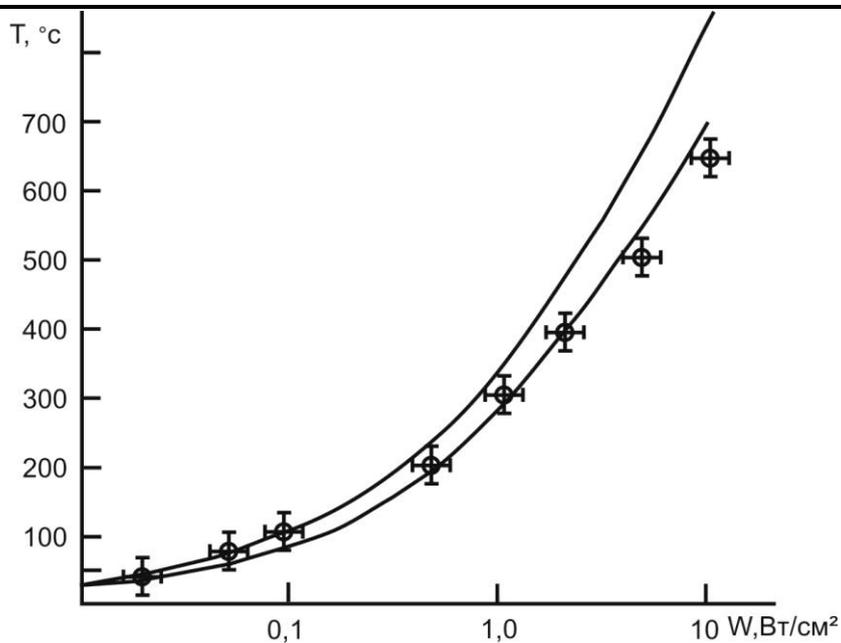


Рис.4.1. Расчетная зависимость температуры поверхности стали от выделяемой удельной мощности в высоком вакууме

Динамика нагрева и остывания поверхности стальной пластины зависит от ее плотности (ρ), теплоемкости (\dot{C}) и толщины (δ). В идеальном случае динамика нагрева будет определяться этими величинами и меняющейся во времени удельной мощностью $W(t)$. Процесс изменения температуры описывается дифференциальным уравнением типа:

$$dT/dt = \{W_y(t) - \xi\sigma(T^4 - T_0^4)\} / \rho\delta\dot{C} \quad (4.29)$$

Характерное время нагрева t объекта от температуры T_0 до T будет определяться от интегралом типа:

$$t = \int \{\rho\delta\dot{C} / [W_y(t) - \xi\sigma(T^4 - T_0^4)]\} dT \quad (4.30)$$

При характерных значениях толщины объекта $200 \div 500$ мкм, плотности материала $3 \div 5$ г/см³ и теплоемкости порядка $0,8 \div 1,0$ Дж/г°С предельная температура поверхности при облучении электронами достигается за время порядка $1 \div 100$ с в зависимости от удельной мощности W . Для массивных объектов

характерное время нагрева и остывания по такому механизму должно быть заметно больше.

4.4.2. Тормозная способность вещества и пробег ускоренных электронов

При взаимодействии ускоренных электронов с металлами и сплавами происходит ряд взаимосвязанных процессов, в результате которых наблюдается эмиссия электронов, фотонов (различные виды излучений), изменение параметров самого твердого тела за счет нагрева, возникновения радиационных дефектов. В результате взаимодействия первичных электронов с твердым телом изменяется направление их движения и энергия (происходит торможение электронов). Наблюдается возникновение электромагнитного излучения, нагрев приповерхностной зоны металлов.

Имеется обширный экспериментальный материал по закономерностям поглощения первичных электронов в различных веществах. При проникновении первичных (ускоренных в вакууме) электронов в твердое тело в отличие от ионов не наблюдается заметного торможения и потери энергии электронов всецело связаны с неупругим рассеянием. Каждый первичный электрон испытывает при движении в твердом теле большое число взаимодействий спектром энергетических потерь. В предположении непрерывных потерь энергии электроном вдоль траектории и однозначной зависимости энергии электрона от пробега $E(l)$ можно рассчитать дифференциальное сечение неупругого рассеяния электронов. Решение этой задачи в различных приближениях показало удовлетворительное описание изменения энергии электронов вдоль пути в материале уравнением Бете:

$$dE/dl = -7,85 \cdot 10^4 Zg/AE \ln bE/I \quad (4.31)$$

где Z , A - атомный номер и вес атомов мишени, g - плотность атомов, $b = 1,166$, E - энергия электронов, I - средняя энергия возбуждения атома. В статистических моделях атомов принимается значение $I = \text{const } Z$ (значение $\text{const} = 13,5$ эВ), что справедливо для высоких энергий электронов (свыше 10 кэВ) и Z более 30.

Иногда используется приближенное выражение для ионизационного потенциала (энергии возбуждения) типа $I(Z) = 10,3 Z (1 - 0,793Z^{-2/3})$ эВ.

Ионизационные потенциалы для различных материалов существенно отличаются и составляют, например для Be (Z=4)- 65,2 эВ, С (Z=6)- 73,8 эВ, Al (Z=13)- 160,1 эВ, Si (Z=14)- 174,5 эВ, Ni (Z=28)- 302,3 эВ, Ag (Z=47)- 469,3 эВ, Au (Z=79)- 806,6 эВ.

В так называемом приближении непрерывного замедления полный пробег частиц (электронов) с начальной энергией E определяется равенством [21].

$$R(E) = \int_0^E dE / n\chi(E) \quad (4.32)$$

где n- атомная плотность среды, $\chi(E)$ - полное эффективное торможение [22].

Для случая нерелятивистских электронов полное эффективное торможение определяется выражением типа:

$$\chi(E) = 2\pi Z e^4 L_{\text{ion}}(E) / E \quad (4.33)$$

где Z- атомный номер материала среды, e- заряд электрона,

$L_{\text{ion}}(E)$ - ионизационный логарифм, определяемый выражением:

$$L_{\text{ion}}(E) = \ln \{ (\exp(1)/2)^{1/2} E / I(Z) \} \quad (4.34)$$

а выражение $I(Z)$ - средний потенциал ионизации атомов среды.

Вычисление интеграла дает выражение для пробега частиц (электронов):

$$R(E) = \exp(-1) / \pi n r_e^2 Z \{ I(Z) / m_e c^2 \}^2 \text{Ei}(2 L_{\text{ion}}(E)), \quad (4.35)$$

где m_e - масса электрона, c- скорость света, $r_e = e^2 / m_e c^2$ - классический радиус электрона, Ei- интегральная показательная функция, подробные таблицы которой содержатся в [23].

При $2L_{\text{ion}}(E) < x_0$, где x_0 - корень уравнения $\text{Ei}(x) = 0$ ($0,37 < x_0 < 0,38$) формула 2.5 теряет смысл (пробег становится отрицательным). Поведение функции $\text{Ei}(x)$ при $x \gg 1$ описывается асимптотической формулой:

$$Ei(x) = e^x/x \{ \sum_{n=0}^{\infty} n!/x^n + O(1/x^N) \} \quad (4.36)$$

Если ионизационный логарифм достаточно велик (при энергиях свыше 10 кэВ для кремния $2 L_{ion}(E)$ превышает 8,4), то для оценок, не требующих большой точности можно использовать выражение типа:

$$R(E) = (E/m_e c^2)^2 / 4\pi n r_e^2 Z L_{ion}(E), \quad (4.37)$$

Причем точность этой формулы несколько повышается, если в аргументе $L_{ion}(E)$ E заменить на $2/3 E$.

Используя в выражении (4.35) два члена ($N=2$) значение $Ei(x)$ составит:

$$Ei(x) = e^x/x(1+1/x) = e^x/(x-1), \quad (4.38)$$

что вновь приводит к выражению вида (2.5) с заменой $L_{ion}(E)$ на $L_{ion}(E^*)$, где E^* равно $\exp(-1/2) E$ и, следовательно, $L_{ion}(E^*) = \ln\{E/2^{1/2} I(Z)\}$.

В ряде случаев значение пробега электронов с точностью до нескольких процентов аппроксимируется в виде степенной функции. Так для определения глубины проникновения электронов часто используют формулу Виддингтона-Томсона:

$$dE/dx = gb/2E \text{ и глубина проникновения } R = E^2/gb, \quad (4.39)$$

где R - пробег, см, E - энергия, кэВ, g - плотность, г/см³, величина $1/b$ меняется в интервале от $2,1 \cdot 10^{-6}$ до $2,54 \cdot 10^{-6}$ кэВ г⁻¹ см² при изменении Z от 13 до 80.

Оценки по формуле (4.38) или выражению типа $R = 2,1 \cdot 10^{-12} E^2/g$, справедливому для случая ($10 \text{ кэВ} < E < 100 \text{ кэВ}$) дают значения пробега электронов в стали около 0,3 мкм при 10 кэВ.

Из-за случайного характера неупругих взаимодействий (соударений) при каждом взаимодействии теряется различная доля энергии, то есть существует статистический разброс энергетических потерь, разброс по пробегам электронов. Теоретические оценки показывают, что электроны, прошедшие путь L в веществе

должны иметь почти гауссово распределение по энергиям, полуширина которого тем больше, чем больше L .

Наблюдаемое экспериментальным путем энергетическое распределение электронов, прошедших сквозь тонкие мишени, асимметрично и заметно отличается от Гауссова, что объясняется угловым рассеянием электронов. Наиболее точным методом расчета индивидуальных траекторий электронов в веществе является статистический метод, основанный на моделировании реального процесса. Более простая феноменологическая модель (например модель Арчада) предполагает, что после прохождения электронами некоторого пути без рассеяния электроны изотропно (диффузно) рассеиваются в сфере. Радиус сферы диффузного рассеяния оценивается выражением типа $(Z-4)R/Z+8$.

При движении электроны рассеиваются многократно. Расчеты углового рассеяния электронов при движении в веществе и пространственного распределения электронов являются сложной теоретической задачей. Как показывают расчеты, сечение углового рассеяния обратно пропорционально энергии электронов и возрастает с ростом атомного номера вещества. Относительная доля электронов, испытавших однократное рассеяние на большой угол (около 90°) невелика (например, при $E=20$ кэВ менее 0,1 % для Al и 0,3 % для Au). Отклонения на углы, превышающие $9-10^\circ$, при тех же условиях происходят с вероятностью 10 % и 28 % соответственно.

4.4.3. Закономерности поглощения ускоренных электронов материалами

Большинство экспериментальных данных о пробегах электронов в различных материалах получено методом прострела свободных (не имеющих подложки) пленок в вакууме. Облучая пленки толщиной x электронами с начальной энергией E_1 и измеряя токи i_1 (первичных), $i_{отр}$ (отраженных), $i_{пр}$ (прошедших) и $i_{погл}$ (поглощенных) электронов можно определить коэффициенты обратного рассеяния $\eta = i_{отр}/i_1$, поглощения $\alpha = i_{погл}/i_1$, прохождения $\gamma = i_{пр}/i_1$.

Основными экспериментальными характеристиками, используемыми для оценки пробегов электронов, являются кривые проникаемости $\gamma(E_1)$ для пленок различной толщины и построенные на их основе кривые ослабления $\gamma(x)$ при различных энергиях. По этим зависимостям можно определить параметры,

характеризующие глубину проникновения электронов. Для каждой толщины пленки можно определить, например, энергию прострела, при которой появляется ток прошедших электронов. Толщина пленки при этом соответствует максимальному пробегу электронов с энергией E_1 ($\gamma=0$). Измерение этих значений зависит от чувствительности приборов, регистрирующих ток прошедших электронов.

В связи с этим для однозначной оценки глубины проникновения необходимо проведение экстраполяции экспериментальной зависимости кривых ослабления. Для кривых проницаемости это дает значение критической энергии прострела пленки и практический пробег. Более корректный способ экспериментального определения глубины проникновения электронов основан на анализе форм кривых ослабления. Зависимости ослабления при разных энергиях можно совместить друг с другом и определить нормальный пробег, соответствующий значению коэффициента прохождения ($\gamma=0,368$), то есть ослаблению в «е» раз.

Ход нормированных кривых зависимостей ослабления хорошо аппроксимируется эмпирической формулой типа:

$$\gamma = \exp\{-(x/R_n)^p\}, \quad (4.40)$$

где x - расстояние, R_n - нормированный пробег, p - показатель степени, зависящий от атомного номера Z и составляющий примерно 2 для Z 15- 20. и падает с ростом Z . Для нескольких материалов в диапазоне энергий 50-200 кэВ p составляет $3,7(Z/A)^{1/2}/\lg Z$.

К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал по исследованию зависимости пробегов электронов от их энергии для различных материалов в диапазоне энергий 0,5÷1000 кэВ. Эти зависимости удовлетворительно описываются степенной функцией вида:

$$ZgR_x/A = kE_1^n, \quad (4.41)$$

где Z , A - атомный номер и атомный вес материала, g - плотность материала, R_x - максимальный пробег электронов, k - коэффициент, зависящий от вещества

($k=3,3Z/A$), n - показатель степени, зависящий от вещества $n=2,44(Z/A)^{1/2}$. Значения коэффициентов меняются в зависимости от энергии, так для диапазонов 5-10 кэВ $k=5,0$, $n=1,5$, для диапазона 10-30 кэВ $k=3,55$, $n=1,65$. С увеличением Z от 10 до 80 k возрастает незначительно, n меняется от 1,60 до 1,52.

Зависимости общего (траекторного) пробега электронов, например определяемая по формуле Бете- R_ϵ и глубина проникновения электронов R_x от энергии имеет одинаковый характер. Коэффициент пропорциональности между ними определяется процессами рассеяния электронов в веществе. Анализ экспериментальных данных показывает, что в случае максимального пробега независимо от материала мишени и энергии электронов справедлива приближенная формула:

$$R_{x\max} = R_\epsilon(0,95 - 1,1\eta), \quad (4.42)$$

где R_ϵ - траекторный пробег, η -коэффициент неупругого отражения электронов.

Это выражение хорошо согласуется с опытными данными в широком диапазоне энергий. Выраженный в единицах массовой толщины (например $\text{мкг}/\text{см}^2$) пробег одинаков для всех веществ при энергиях 1-30 кэВ.

Коэффициент обратного рассеяния электронов (неупругого отражения η) существенно зависит от атомного номера материала и энергии электронов. По многочисленным экспериментальным данным при энергиях первичных электронов более 1 кэВ η монотонно возрастает с атомным номером в результате увеличения рассеивающей способности вещества (от 0,05 до 0,4-0,6). Так для $Z=10-20$ η составляет 0,1-0,2, для $Z=60-80$ η составляет 0,4-0,5. Зависимость $\eta(E_1)$ различна для легких и тяжелых элементов, однако в диапазоне 2-50 кэВ почти не меняется с ростом E_1 . Числовые значения η с трудом поддаются теоретическому расчету и для практических целей удобно пользоваться интерполяцией. При энергии 20 кэВ η составляет: для Be- 0,043, для C-0,066, для Al- 0,164, для Si- 0,176, для Ti- 0,363, для Ni- 0,317, для Zr- 0,384, для Ag-0,412, для W- 0,492.

При электронном облучении важным параметром является пространственное распределение поглощенной веществом (образцом) энергии электронов по толщине. Экспериментально измеренные распределения удельных потерь энергии (МэВ/см) показывают наличие максимума в приповерхностной области, обусловленного угловым рассеянием электронов. Этот максимум смещается внутрь образца с ростом E_1 и по закону Бете удельные потери возрастают по мере торможения электронов. Так максимумы потерь энергии электронов в меди при $E_1 = 20$ кэВ наблюдаются в области глубин 0,3 мкм, а при $E_1 = 10$ кэВ в области до 0,1 мкм. Для алюминия при $E_1 = 15$ кэВ максимум потерь находится в области 0,8-1,0 мкм, а при $E_1 = 5$ кэВ не превышает 0,3 мкм.

Большая часть поглощенной материалом энергии электронов переходит в теплоту, то есть приводит к нагреву образца. Пока не меняется агрегатное состояние материала закономерности проникновения электронов остаются одинаковыми (вплоть до удельной мощности $10^4 - 10^5$ Вт/см²). Как показывают расчеты максимум поглощенной энергии (мощности) находится на оси электронного потока под поверхностью мишени. Так как глубина проникновения электронов увеличивается с ростом их энергии максимальная поглощенная удельная мощность падает при возрастании E_1 . Максимальная температура обрабатываемого образца зависит от выделяемой удельной мощности и теплопроводности образца.

4.4.4. Эмиссия

С целью термической обработки образцов из стали было разработано устройство, позволяющее проводить электронную обработку образца (обработку потоком электронов с большой энергией).

Электронно-лучевые пушки, предназначены для получения и ускорения свободных электронов при обработке объектов с различными целями. Эля получения электронов служит эмиттер. В узле формирования пучка электроны ускоряются в электростатических полях и формируются в пучок. Для формирования пучка используются главным образом магнитные линзы и отклоняющие системы.

В зависимости от задач конкретных процессов мощности электронных потоков могут отличаться на несколько порядков, так же отличаются размеры пятен электронных пучков, но не смотря на это, большинство электронных пушек сходны друг с другом и в их основу положены одни и те же физические принципы эмиссии электронов и формирования пучков. При разработке пушек в основном применяются результаты исследований и технические решения из области электронной микроскопии и конструирования электронно-лучевых трубок (пушек малой мощности).

Свободные электроны можно получить, прежде всего, из накальных катодов. Достижимая плотность токов эмиссии таких катодов зависит от температуры согласно закону Ричардсона:

$$J_e = AT^2 e^{-b/T} \quad (4.43)$$

Где A - постоянная Ричардсона, b -параметр, характеризующий работу выхода электрона, E - абсолютная температура.

Из материалов катода чаще всего используются вольфрам, тантал, гексаборид лантана, имеющие высокие температуры плавления. Для вольфрама типичны плотности тока $1-10 \text{ A/cm}^2$ без дополнительной активации катода. При эмиссии электронов у поверхности образуется электронное облако и пространственный заряд ограничивает поток электронов. Плотность тока эмиссии при этом определяется по закону Ленгмюра:

$$J_e = 2,310^{-5} KU^{3/2} \quad (4.44)$$

где K - коэффициент, зависящий от геометрии, cm^{-2} , U -ускоряющее напряжение, В.

Принципиальная схема устройств электростатических генераторов электронов может быть довольно простой. Она содержит два электрода и накальный катод. Ток регулируется путем изменения температуры катода и изменения ускоряющего напряжения. Система не обладает фокусирующими свойствами, а анодная диафрагма оказывает на пучок рассеивающее действие. Тем не менее, для задачи

обработки поверхности потоком электронов с энергией до 20 кэВ такая конструкция является оптимальной.

Для получения эмиссии электронов может быть успешно использован прямонакальный вольфрамовый катод (проволока) диаметром 200 мкм. Как показали предварительные исследования, для получения эмиссионного тока на основе вольфрамовых катодов в вакууме (степень вакуума порядка 10^{-3} Па) требуются различные токи накала (токи, пропускаемые через катод). Так для катода диаметром около 0,2 мм токи накала составляют 3-4А. Для катода, диаметр которого составляет 0,4-0,5 мм необходим ток накала около 20 А. Для диаметра катода около 1,0 мм этот ток достигает значений 50-60 А, а для диаметра 1,5 мм превышает 100-120А. Так как в высоком вакууме не наблюдается активного распыления катода, а для решения поставленных задач не требуется больших токов эмиссии, толщина катода может составлять 0,2-0,3 мм.

В этом случае ток накала, достаточный для эмиссии порядка 1-10 мА составляет около 4А (переменного напряжения), что не требует мощных вводов в вакуум и больших понижающих трансформаторов.

Глава V.

5. Фазовые превращения в быстрорежущих сталях P18 и P6M5K5 при вакуумно-термической обработке

В данной главе проведено расчетное исследование фазовых превращений в быстрорежущих сталях Р18 и Р6М5К5 при термической обработке в вакууме.

В расчете задавались содержание химических элементов в рабочем теле и численные значения двух термодинамических параметров – давление в вакуумной камере P (Па) и температура процесса T (К). В качестве инертного газа принят аргон. Задавались содержание химических элементов для быстрорежущих сталей Р18, Р6М5, Р6М5К5 и количество газа (азот и кислород) в вакуумной камере.

Исследовалось влияние температуры термической обработки, давления в вакуумной камере на фазовый и химический состав в быстрорежущих сталях. Давление изменялось в пределах от 0.008 до 1.06 Па, температура подложки – от 1200 до 1550 К. Результаты расчетного фазового превращения в быстрорежущих сталях представлены в виде табличных значений.

При задании значений термодинамических параметров за названием должен следовать знак =, а после него через запятую указываются требуемые величины в форме целых чисел или чисел десятичной точкой (нельзя использовать экспоненциальную запись, когда для обозначения порядка числа применяются символы E или G).

Например, при составлении входных данных для расчета, давление $P=3 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст $=4 \cdot 10^{-8}$ МПа пишется в виде: $P=0.00000004$. Температура задается в абсолютных значениях $T=t+273^0\text{C}$. Показание давления в вакуумной камере в мм.рт.ст. производится с помощью прибора ВИТ-3. Для перевода значения давления в Па используется соотношение $1\text{мм.рт.ст.}=1,33 \cdot 10^2$ Па. Тогда $P=3 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст $\cdot 1,33 \cdot 10^2$ Па $\approx 4 \cdot 10^{-2}$ Па.

Количество газа в вакуумной камере рассчитывается с помощью физической модели. При этом учитывается, что газ (воздух) в камере состоит в основном из кислорода и азота 78 и 21% соответственно. Например при $P=4 \cdot 10^{-2}$ Па, количество воздуха (кислород и азот) в вакуумной камере -5,35% мас. Из них $\text{O}_2=4,23\%$ мас., $\text{N}_2=1,12\%$ мас.

Анализ полученных расчетных данных показывает, что на фазовый состав быстрорежущих сталей оказывают влияние давление и температура. При давлении

азота в вакуумной камере $P=1.06-0.004$ Па и температуре процесса $1200-1550$ С формируются фазы: k^*Co , $k^*Cr_2O_3$, k^*FeO , k^*Mo , k^*Fe и др.

Состав газовой фазы в рабочем пространстве меняется в зависимости от температуры. Так в интервале температур $1200-1550^\circ$ С газовая фаза состоит из молекулярного азота N_2 , NO , Fe , FeO , Co , CoO , Cr , CrO , CrO_2 , MoO_2 , MoO_3 , Mo_2O_6 .

Расчет фазового и химического состава при давлении $P= 0.0000011$ МПа

Исходные данные

```
<Step<noion<pr>
p=0.0000011, t=1200,50,1550,
(1.12%N2), (4.23%O2),
(4.0%Cr), (5.0%Co), (5.0%Mo),
(77.1%Fe);
```

Брутто-формула раб.тела: N .829049 O 2.74116 CR .797605 CO .879646
MO .540341 FE 14.3137

Характеристики равновесия - СИ

P= 11000-05 T= 12000+04 V= 37597+04 S= 15030+01 I=-26759+03
U=-27172+03 M= 16547+02 Cp= 65214+00 k= 10053+01 Cp''= 65217+00
k''= 10053+01 A= 64481+02 Mu= 44436-04 Lt= 76492-01 Lt''= 76494-01
MM= 60434+02 Cp.r= 12021+01 k.r= 13279+01 MM.r= 28014+02 R.r= 29681+03
Z= 98839+00 Пл= 00000-00 Bm= 11665-12

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2 99999+00 k*Fe 77346+00 Fe 47257-05
k*FeO 33342-01 k*Co 51840-01 k*Cr2O3 60614-01
k*MoO2 69131-01

Характеристики равновесия - СИ

P= 11000-05 T= 12500+04 V= 39167+04 S= 15509+01 I=-20887+03
U=-21318+03 M= 16547+02 Cp= 65853+00 k= 10053+01 Cp''= 65870+00
k''= 10053+01 A= 65809+02 Mu= 45629-04 Lt= 79016-01 Lt''= 79032-01
MM= 60434+02 Cp.r= 12099+01 k.r= 13250+01 MM.r= 28014+02 R.r= 29680+03
Z= 98839+00 Пл= 00000-00 Bm= 93622-12

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2 99997+00 k*Fe 71311+00 Fe 23594-04
k*FeO 11098+00 k*Co 51840-01 Co 68818-05
k*Cr2O3 60614-01 k*Mo 51840-01

Характеристики равновесия - СИ

P= 11000-05 T= 13000+04 V= 40738+04 S= 15769+01 I=-17570+03
U=-18018+03 M= 16547+02 Cp= 66777+00 k= 10052+01 Cp''= 66845+00
k''= 10052+01 A= 67111+02 Mu= 46803-04 Lt= 81503-01 Lt''= 81577-01
MM= 60434+02 Cp.r= 12172+01 k.r= 13224+01 MM.r= 28018+02 R.r= 29676+03
Z= 98838+00 Пл= 00000-00 Bm= 63936-11

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2 99986+00 k*Fe 71311+00 Fe 10385-03
k*FeO 11098+00 k*Co 51840-01 Co 32284-04
k*Cr2O3 60614-01 k*Mo 51840-01 MoO3 50784-05

Характеристики равновесия - СИ

P= 11000-05 T= 13500+04 V= 42323+04 S= 16024+01 I=-14200+03
U=-14665+03 M= 16547+02 Cp= 67737+00 k= 10051+01 Cp''= 67990+00
k''= 10053+01 A= 68392+02 Mu= 47957-04 Lt= 83931-01 Lt''= 84263-01
MM= 60434+02 Cp.r= 12235+01 k.r= 13200+01 MM.r= 28032+02 R.r= 29662+03
Z= 98837+00 Пл= 00000-00 Bm= 37835-10

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2 99943+00 k*Fe 71310+00 Fe 40866-03
k*FeO 11098+00 k*Co 51837-01 Co 13456-03
k*Cr2O3 60614-01 k*Mo 51839-01 MoO3 21565-04

Характеристики равновесия - СИ

P= 11000-05 T= 14000+04 V= 43955+04 S= 16269+01 I=-10729+03
 U=-11213+03 M= 16547+02 Cp= 67990+00 k= 10051+01 Cp"= 68866+00
 k"= 10058+01 A= 69664+02 Mu= 49082-04 Lt= 86223-01 Lt"= 87475-01
 MM= 60434+02 Cp.r= 12275+01 k.r= 13179+01 MM.r= 28082+02 R.r= 29609+03
 Z= 98833+00 Пл= 00000-00 Bm= 19715-09

Содержание компонентов - объем. (масс.) доли

N2 99790+00 k*Fe 71308+00 Fe 14551-02
 k*FeO 11098+00 k*Co 51827-01 Co 55573-03
 k*Cr2O3 60614-01 k*Mo 51837-01 MoO3 82182-04
 Mo2O6 29779-05

Характеристики равновесия - СИ

P= 11000-05 T= 14500+04 V= 45748+04 S= 16513+01 I=-72487+02
 U=-77520+02 M= 16547+02 Cp= 68214+00 k= 10051+01 Cp"= 70931+00
 k"= 10075+01 A= 70956+02 Mu= 50150-04 Lt= 88163-01 Lt"= 92458-01
 MM= 60434+02 Cp.r= 12253+01 k.r= 13163+01 MM.r= 28241+02 R.r= 29442+03
 Z= 98821+00 Пл= 00000-00 Bm= 91881-09

Содержание компонентов - объем. (масс.) доли

N2 99306+00 k*Fe 71302+00 Fe 47371-02
 k*FeO 11096+00 k*Co 51794-01 Co 18937-02
 k*Cr2O3 60614-01 k*Mo 51828-01 MoO2 10246-04
 MoO3 28426-03 Mo2O6 10771-04

Характеристики равновесия - СИ

P= 11000-05 T= 15000+04 V= 47987+04 S= 16766+01 I=-36231+02
 U=-41510+02 M= 16547+02 Cp= 68827+00 k= 10051+01 Cp"= 76555+00
 k"= 10129+01 A= 72362+02 Mu= 51089-04 Lt= 89196-01 Lt"= 10269+00
 MM= 60434+02 Cp.r= 12076+01 k.r= 13157+01 MM.r= 28695+02 R.r= 28976+03
 Z= 98785+00 Пл= 00000-00 Bm= 38955-08

Содержание компонентов - объем. (масс.) доли

N2 97938+00 k*Fe 71284+00 Fe 14227-01
 k*FeO 11089+00 FeO 60127-05 k*Co 51706-01
 Co 54001-02 Cr 24612-05 k*Cr2O3 60614-01
 k*Mo 51799-01 MoO2 40552-04 MoO3 90098-03
 Mo2O6 35513-04

Характеристики равновесия - СИ

P= 11000-05 T= 15500+04 V= 51578+04 S= 17037+01 I= 51755+01
 U=-49806+00 M= 16547+02 Cp= 69458+00 k= 10053+01 Cp"= 91574+00
 k"= 10335+01 A= 74304+02 Mu= 51718-04 Lt= 87842-01 Lt"= 12656+00
 MM= 60434+02 Cp.r= 11513+01 k.r= 13177+01 MM.r= 29956+02 R.r= 27756+03
 Z= 98681+00 Пл= 00000-00 Bm= 15428-07

Содержание компонентов - объем. (масс.) доли

N2 94161+00 NO 33151-05 k*Fe 71235+00
 Fe 39730-01 k*FeO 11070+00 FeO 22582-04
 k*Co 51433-01 Co 15711-01 CoO 35199-05
 Cr 10375-04 CrO 32968-05 CrO2 81799-05
 k*Cr2O3 60613-01 k*Mo 51713-01 MoO2 14628-03
 MoO3 26389-02 Mo2O6 10766-03

Расчет фазового и химического состава при давлении P= 0.0000004МПа

Исходные данные

```
<Step<noion<pr>
p=0.0000004, t=1200,50,1550,
(1.12%N2), (4.23%O2),
(4.0%Cr), (5.0%Co), (5.0%Mo),
(77.1%Fe),
(4%K*VC),
(18%K*Fe4W2C),
MX1=k*W2C,k*V2C;
```

В базе данных нет свойств вещества : k*W2C
 В базе данных нет свойств вещества : k*V2C
 Брутто-формула раб.тела: N .829049 O 2.74116 CR .797605 CO .879646
 MO .540341 FE 14.3137

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-06 T= 12000+04 V= 10339+05 S= 15064+01 I=-26759+03
 U=-27172+03 M= 16547+02 Cp= 65214+00 k= 10053+01 Cp"= 65223+00
 k"= 10053+01 A= 64481+02 Mu= 44436-04 Lt= 76491-01 Lt"= 76497-01
 MM= 60434+02 Cp.r= 12021+01 k.r= 13279+01 MM.r= 28014+02 R.r= 29680+03
 Z= 98839+00 Пл= 00000-00 Bm= 00000-00

Содержание компонентов - объем. (масс.) доли

N2 99998+00 k*Fe 77346+00 Fe 12996-04
 k*FeO 33342-01 k*Co 51840-01 Co 35325-05
 k*Cr2O3 60614-01 k*MoO2 69131-01

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-06 T= 12500+04 V= 10772+05 S= 15544+01 I=-20886+03
 U=-21317+03 M= 16547+02 Cp= 65853+00 k= 10053+01 Cp"= 65899+00
 k"= 10053+01 A= 65810+02 Mu= 45628-04 Lt= 79012-01 Lt"= 79053-01
 MM= 60434+02 Cp.r= 12098+01 k.r= 13251+01 MM.r= 28016+02 R.r= 29678+03
 Z= 98839+00 Пл= 00000-00 Bm= 00000-00

Содержание компонентов - объем. (масс.) доли

N2 99991+00 k*Fe 71311+00 Fe 64885-04
 k*FeO 11098+00 k*Co 51840-01 Co 18925-04
 k*Cr2O3 60614-01 k*Mo 51840-01 MoO3 29137-05

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-06 T= 13000+04 V= 11206+05 S= 15804+01 I=-17565+03
 U=-18014+03 M= 16547+02 Cp= 66777+00 k= 10052+01 Cp"= 66965+00
 k"= 10053+01 A= 67114+02 Mu= 46800-04 Lt= 81481-01 Lt"= 81690-01
 MM= 60434+02 Cp.r= 12167+01 k.r= 13225+01 MM.r= 28026+02 R.r= 29668+03
 Z= 98838+00 Пл= 00000-00 Bm= 00000-00

Содержание компонентов - объем. (масс.) доли

N2 99961+00 k*Fe 71310+00 Fe 28558-03
 k*FeO 11098+00 k*Co 51838-01 Co 88781-04
 k*Cr2O3 60614-01 k*Mo 51840-01 MoO3 13966-04

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-06 T= 13500+04 V= 11650+05 S= 16060+01 I=-14183+03
 U=-14649+03 M= 16547+02 Cp= 67736+00 k= 10051+01 Cp"= 68435+00
 k"= 10056+01 A= 68404+02 Mu= 47944-04 Lt= 83841-01 Lt"= 84719-01
 MM= 60434+02 Cp.r= 12218+01 k.r= 13201+01 MM.r= 28064+02 R.r= 29628+03
 Z= 98835+00 Пл= 00000-00 Bm= 00000-00

Содержание компонентов - объем. (масс.) доли

N2 99844+00 k*Fe 71309+00 Fe 11238-02
 k*FeO 11098+00 k*Co 51831-01 Co 37002-03
 k*Cr2O3 60614-01 k*Mo 51838-01 MoO3 59301-04

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-06 T= 14000+04 V= 12133+05 S= 16308+01 I=-10667+03
 U=-11153+03 M= 16547+02 Cp= 67988+00 k= 10051+01 Cp"= 70412+00
 k"= 10071+01 A= 69710+02 Mu= 49034-04 Lt= 85882-01 Lt"= 89210-01
 MM= 60434+02 Cp.r= 12211+01 k.r= 13183+01 MM.r= 28201+02 R.r= 29483+03
 Z= 98824+00 Пл= 00000-00 Bm= 00000-00

Содержание компонентов - объем. (масс.) доли

N2 99423+00 k*Fe 71303+00 Fe 40015-02
 k*FeO 11096+00 k*Co 51803-01 Co 15283-02
 k*Cr2O3 60614-01 k*Mo 51830-01 MoO2 64249-05
 MoO3 22601-03 Mo2O6 81894-05

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-06 T= 14500+04 V= 12737+05 S= 16563+01 I=-70403+02
 U=-75497+02 M= 16547+02 Cp= 68207+00 k= 10052+01 Cp"= 75863+00
 k"= 10125+01 A= 71134+02 Mu= 49991-04 Lt= 87016-01 Lt"= 98461-01
 MM= 60434+02 Cp.r= 12046+01 k.r= 13175+01 MM.r= 28639+02 R.r= 29033+03
 Z= 98790+00 Пл= 00000-00 Bm= 00000-00

Содержание компонентов - объем. (масс.) доли

N2 98092+00 k*Fe 71286+00 Fe 13027-01
 k*FeO 11091+00 FeO 40053-05 k*Co 51711-01
 Co 52077-02 k*Cr2O3 60614-01 k*Mo 51805-01
 MoO2 28177-04 MoO3 78172-03 Mo2O6 29622-04

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-06 T= 15000+04 V= 13702+05 S= 16845+01 I=-29711+02
 U=-35192+02 M= 16547+02 Cp= 68802+00 k= 10053+01 Cp"= 91711+00
 k"= 10336+01 A= 73099+02 Mu= 50628-04 Lt= 85783-01 Lt"= 12140+00

MM= 60434+02 Cp.r= 11491+01 k.r= 13194+01 MM.r= 29887+02 R.r= 27820+03
Z= 98687+00 Пл= 00000-00 Bm= 00000-00

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2	94330+00	k*Fe	71235+00	Fe	39126-01
k*FeO	11072+00	FeO	16535-04	k*Co	51456-01
Co	14851-01	CoO	24810-05	Cr	67684-05
CrO2	51319-05	k*Cr2O3	60614-01	k*Mo	51723-01
MoO2	11152-03	MoO3	24778-02	Mo2O6	97662-04

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-06 T= 15500+04 V= 15910+05 S= 17215+01 I= 26727+02
U= 20362+02 M= 16547+02 Cp= 69376+00 k= 10060+01 Cp''= 14590+01
k''= 11296+01 A= 77682+02 Mu= 50487-04 Lt= 78595-01 Lt''= 17572+00
MM= 60434+02 Cp.r= 10078+01 k.r= 13286+01 MM.r= 33356+02 R.r= 24927+03
Z= 98353+00 Пл= 00000-00 Bm= 00000-00

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

O	58168-05	O2	22070-05	N2	83943+00
NO	51906-05	k*Fe	71077+00	Fe	10926+00
k*FeO	11012+00	FeO	62101-04	k*Co	50583-01
Co	43205-01	CoO	96798-05	Cr	28532-04
CrO	90661-05	CrO2	22495-04	k*Cr2O3	60612-01
k*Mo	51449-01	MoO2	40228-03	MoO3	72571-02
Mo2O6	29606-03	Mo3O9	38628-05		

Расчет фазового и химического состава при давлении P= 0.00000011МПа

Исходные данные

```
<Step<noion<pr>>  
p=0.00000011, t=1200,50,1550,  
(1.12%N2), (4.23%O2),  
(4.0%Cr), (5.0%Co), (5.0%Mo),  
(77.1%Fe),  
(4%K*VC),  
(18%K*Fe4W2C);
```

Брутто-формула раб.тела: N .829049 O 2.74116 CR .797605 CO .879646
MO .540341 FE 14.3137

Характеристики равновесия - СИ

P= 11000-06 T= 12000+04 V= 37598+05 S= 15109+01 I=-26758+03
U=-27171+03 M= 16547+02 Cp= 65214+00 k= 10053+01 Cp''= 65249+00
k''= 10053+01 A= 64482+02 Mu= 44436-04 Lt= 76487-01 Lt''= 76510-01
MM= 60434+02 Cp.r= 12020+01 k.r= 13279+01 MM.r= 28016+02 R.r= 29679+03
Z= 98839+00 Пл= 00000-00 Bm= 11666-11

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2	99994+00	k*Fe	77346+00	Fe	47256-04
k*FeO	33342-01	k*Co	51840-01	Co	12845-04
k*Cr2O3	60614-01	k*MoO2	69131-01		

Характеристики равновесия - СИ

P= 11000-06 T= 12500+04 V= 39179+05 S= 15589+01 I=-20882+03
U=-21313+03 M= 16547+02 Cp= 65853+00 k= 10053+01 Cp''= 66019+00
k''= 10054+01 A= 65813+02 Mu= 45625-04 Lt= 78992-01 Lt''= 79136-01
MM= 60434+02 Cp.r= 12094+01 k.r= 13251+01 MM.r= 28023+02 R.r= 29670+03
Z= 98838+00 Пл= 00000-00 Bm= 93648-11

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2	99968+00	k*Fe	71310+00	Fe	23594-03
k*FeO	11098+00	k*Co	51839-01	Co	68818-04
k*Cr2O3	60614-01	k*Mo	51840-01	MoO3	10595-04

Характеристики равновесия - СИ

P= 11000-06 T= 13000+04 V= 40788+05 S= 15850+01 I=-17548+03
U=-17997+03 M= 16547+02 Cp= 66776+00 k= 10052+01 Cp''= 67463+00
k''= 10057+01 A= 67127+02 Mu= 46786-04 Lt= 81391-01 Lt''= 82119-01
MM= 60434+02 Cp.r= 12150+01 k.r= 13226+01 MM.r= 28059+02 R.r= 29633+03
Z= 98835+00 Пл= 00000-00 Bm= 64015-10

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2	99859+00	k*Fe	71309+00	Fe	10384-02
k*FeO	11098+00	k*Co	51832-01	Co	32283-03
k*Cr2O3	60614-01	k*Mo	51838-01	MoO3	50782-04

Характеристики равновесия - СИ

P=	11000-06	T=	13500+04	V=	42538+05	S=	16109+01	I=	-14114+03
U=	-14582+03	M=	16547+02	Cp=	67733+00	k=	10051+01	Cp''=	70296+00
k''=	10072+01	A=	68456+02	Mu=	47889-04	Lt=	83469-01	Lt''=	86558-01
MM=	60434+02	Ср.г=	12148+01	k.г=	13206+01	MM.г=	28196+02	R.г=	29489+03
Z=	98825+00	Пл=	00000-00	Bm=	38028-09				

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2	99434+00	k*Fe	71303+00	Fe	40865-02
k*FeO	11096+00	k*Co	51807-01	Co	13455-02
k*Cr2O3	60614-01	k*Mo	51831-01	MoO2	47530-05
MoO3	21564-03	Mo2O6	74287-05		

Характеристики равновесия - СИ

P=	11000-06	T=	14000+04	V=	44804+05	S=	16372+01	I=	-10406+03
U=	-10899+03	M=	16547+02	Cp=	67977+00	k=	10052+01	Cp''=	77070+00
k''=	10138+01	A=	69940+02	Mu=	48834-04	Lt=	84482-01	Lt''=	96214-01
MM=	60434+02	Ср.г=	11955+01	k.г=	13199+01	MM.г=	28696+02	R.г=	28975+03
Z=	98785+00	Пл=	00000-00	Bm=	20096-08				

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2	97901+00	k*Fe	71283+00	Fe	14551-01
k*FeO	11090+00	FeO	31771-05	k*Co	51702-01
Co	55574-02	k*Cr2O3	60614-01	k*Mo	51804-01
MoO2	23363-04	MoO3	82184-03	Mo2O6	29780-04

Характеристики равновесия - СИ

P=	11000-06	T=	14500+04	V=	48819+05	S=	16673+01	I=	-61187+02
U=	-66557+02	M=	16547+02	Cp=	68172+00	k=	10055+01	Cp''=	99103+00
k''=	10444+01	A=	72244+02	Mu=	49350-04	Lt=	82406-01	Lt''=	12215+00
MM=	60434+02	Ср.г=	11248+01	k.г=	13229+01	MM.г=	30287+02	R.г=	27453+03
Z=	98651+00	Пл=	00000-00	Bm=	98051-08				

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2	93060+00	k*Fe	71216+00	Fe	47373-01
k*FeO	11068+00	FeO	14565-04	k*Co	51343-01
Co	18938-01	CoO	23073-05	Cr	52854-05
CrO2	38325-05	k*Cr2O3	60614-01	k*Mo	51705-01
MoO2	10246-03	MoO3	28427-02	Mo2O6	10772-03

Характеристики равновесия - СИ

P=	11000-06	T=	15000+04	V=	59207+05	S=	17118+01	I=	36133+01
U=	-28995+01	M=	16547+02	Cp=	68677+00	k=	10064+01	Cp''=	18630+01
k''=	11947+01	A=	78591+02	Mu=	48841-04	Lt=	72830-01	Lt''=	18697+00
MM=	60434+02	Ср.г=	94938+00	k.г=	13360+01	MM.г=	34827+02	R.г=	23874+03
Z=	98181+00	Пл=	00000-00	Bm=	48063-07				

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

O	55816-05	O2	20815-05	N2	79381+00
NO	38691-05	k*Fe	70983+00	Fe	14228+00
k*FeO	10986+00	FeO	60129-04	k*Co	50178-01
Co	54003-01	CoO	90218-05	Cr	24613-04
CrO	69117-05	CrO2	18662-04	k*Cr2O3	60612-01
k*Mo	51332-01	MoO2	40553-03	MoO3	90101-02
Mo2O6	35514-03	Mo3O9	40981-05		

Характеристики равновесия - СИ

P=	11000-06	T=	15500+04	V=	11671+06	S=	18587+01	I=	22875+03
U=	21591+03	M=	16546+02	Cp=	68608+00	k=	10122+01	Cp''=	12006+02
k''=	23573+01	A=	11222+03	Mu=	46233-04	Lt=	48154-01	Lt''=	-36286-02
MM=	60437+02	Ср.г=	63271+00	k.г=	13831+01	MM.г=	47440+02	R.г=	17527+03
Z=	95274+00	Пл=	00000-00	Bm=	34910-06				

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

O	21152-04	O2	80256-05	N2	41613+00
NO	69690-05	k*Fe	69594+00	Fe	39731+00
k*FeO	10463+00	FeO	22582-03	k*Co	42615-01
Co	15711+00	CoO	35199-04	Cr	10375-03
CrO	32968-04	CrO2	81800-04	k*Cr2O3	60598-01
k*Mo	48969-01	MoO	11785-05	MoO2	14628-02
MoO3	26389-01	Mo2O6	10766-02	Mo3O9	14047-04

Расчет фазового и химического состава при давлении P= 0.00000004МПа

Исходные данные

<Step<noion<pr>

p=0.00000004, t=1200,50,1550,
 (1.12%N2), (4.23%O2), (0.9%C),
 (4.0%Cr), (6.0%W), (2.0%V), (5.0%Co), (5.0%Mo),
 (77.1%Fe);

Брутто-формула раб.тела: N .75901 O 2.50959 C .711261 CR .730223 W .30978
 V .37267 CO .805333 MO .494693 FE 13.1045

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-07 T= 12000+04 V= 27213+06 S= 16645+01 I=-16382+03
 U=-17471+03 M= 16357+02 Cp= 61930+00 k= 10149+01 Cp"= 62186+00
 k"= 10150+01 A= 10510+03 Mu= 44543-04 Lt= 77574-01 Lt"= 77645-01
 MM= 61138+02 Cp.r= 12243+01 k.r= 12910+01 MM.r= 30129+02 R.r= 27597+03
 Z= 96713+00 Пл= 00000-00 Bm= 17292-02

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2 34787+00 CO 52000+00 CO2 13196+00
 k*Fe 73184+00 Fe 12997-03 k*Co 47459-01
 Co 35327-04 k*Cr2O3 55493-01 k*Mo 47461-01
 MoO3 95423-06 k*W 56952-01 W2O6 20407-05
 k*V2O3 27928-01

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-07 T= 12500+04 V= 28365+06 S= 16902+01 I=-13235+03
 U=-14369+03 M= 16356+02 Cp= 62741+00 k= 10147+01 Cp"= 63953+00
 k"= 10154+01 A= 10729+03 Mu= 45742-04 Lt= 80107-01 Lt"= 80613-01
 MM= 61138+02 Cp.r= 12312+01 k.r= 12886+01 MM.r= 30152+02 R.r= 27575+03
 Z= 96708+00 Пл= 00000-00 Bm= 17277-02

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2 34762+00 CO 51975+00 CO2 13176+00
 k*Fe 73181+00 Fe 64882-03 k*Co 47449-01
 Co 18924-03 k*Cr2O3 55493-01 k*Mo 47460-01
 MoO3 64977-05 k*W 56946-01 W2O6 14516-04
 W3O9 17099-05 VO2 39816-05 k*V2O3 27928-01

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-07 T= 13000+04 V= 29590+06 S= 17160+01 I=-99402+02
 U=-11124+03 M= 16356+02 Cp= 63572+00 k= 10145+01 Cp"= 68674+00
 k"= 10177+01 A= 10954+03 Mu= 46910-04 Lt= 82394-01 Lt"= 85502-01
 MM= 61138+02 Cp.r= 12330+01 k.r= 12867+01 MM.r= 30265+02 R.r= 27473+03
 Z= 96686+00 Пл= 00000-00 Bm= 17189-02

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2 34656+00 CO 51884+00 CO2 13069+00
 k*Fe 73167+00 Fe 28558-02 k*Co 47404-01
 Co 88779-03 k*Cr2O3 55493-01 k*Mo 47457-01
 MoO2 97367-06 MoO3 37447-04 k*W 56908-01
 W2O6 85724-04 W3O8 47988-05 W3O9 12215-04
 VO2 24932-04 k*V2O3 27925-01 V4O8 26806-05

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-07 T= 13500+04 V= 31098+06 S= 17442+01 I=-62019+02
 U=-74459+02 M= 16356+02 Cp= 64413+00 k= 10145+01 Cp"= 83771+00
 k"= 10277+01 A= 11218+03 Mu= 48019-04 Lt= 83848-01 Lt"= 99348-01
 MM= 61140+02 Cp.r= 12168+01 k.r= 12861+01 MM.r= 30719+02 R.r= 27067+03
 Z= 96596+00 Пл= 00000-00 Bm= 16795-02

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2 34244+00 CO 51563+00 CO2 12618+00
 k*Fe 73115+00 Fe 11238-01 FeO 11325-05
 k*Co 47219-01 Co 37003-02 k*Cr2O3 55493-01
 k*Mo 47441-01 MoO2 58244-05 MoO3 17639-03
 Mo2O6 18075-05 k*W 56741-01 WO3 45421-05
 W2O6 38560-03 W3O8 26855-04 W3O9 61190-04
 VO2 13418-03 k*V2O3 27912-01 V4O8 14578-04

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-07 T= 14000+04 V= 33699+06 S= 17821+01 I=-90185+01
 U=-22498+02 M= 16355+02 Cp= 64548+00 k= 10151+01 Cp"= 13581+01
 k"= 10695+01 A= 11658+03 Mu= 48843-04 Lt= 82500-01 Lt"= 14132+00
 MM= 61144+02 Cp.r= 11494+01 k.r= 12898+01 MM.r= 32194+02 R.r= 25827+03

Z= 96272+00 Пл= 00000-00 Вm= 15715-02
 Содержание компонентов - объем. (масс.) доли
 N2 32773+00 CO 50124+00 CO2 11299+00
 k*Fe 72926+00 Fe 40018-01 FeO 57030-05
 k*Co 46418-01 Co 15284-01 CoO 86485-06
 Cr 53012-05 CrO2 15564-05 k*Cr2O3 55493-01
 k*Mo 47387-01 MoO2 27372-04 MoO3 62845-03
 Mo2O6 63318-05 k*W 56312-01 WO3 18664-04
 W2O6 11153-02 W3O8 85230-04 W3O9 16578-03
 W4O12 15756-05 VO2 62055-03 k*V2O3 27853-01
 V4O8 62453-04

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-07 T= 14500+04 V= 40546+06 S= 18578+01 I= 99147+02
 U= 82929+02 M= 16354+02 Cp= 64465+00 k= 10177+01 Cp''= 35382+01
 k''= 12417+01 A= 12798+03 Mu= 48478-04 Lt= 73557-01 Lt''= 23559+00
 MM= 61146+02 Cp.r= 97954+00 k.r= 13075+01 MM.r= 36089+02 R.r= 23039+03
 Z= 95145+00 Пл= 00000-00 Вm= 13851-02

Содержание компонентов - объем. (масс.) доли

O 21875-05 N2 28211+00 NO 85456-06
 CO 44301+00 CO2 85722-01 k*Fe 72206+00
 Fe 13028+00 FeO 23738-04 k*Co 43332-01
 Co 52080-01 CoO 37605-05 Cr 31859-04
 CrO 46380-05 CrO2 81138-05 k*Cr2O3 55489-01
 k*Mo 47235-01 MoO2 98970-04 MoO3 16272-02
 Mo2O6 12835-04 k*W 55745-01 WO2 11818-05
 WO3 55201-04 W2O6 18926-02 W3O8 13542-03
 W3O9 21059-03 W4O12 14862-05 VO2 24766-02
 k*V2O3 27595-01 V4O8 20635-03

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-07 T= 15000+04 V= 76131+06 S= 21784+01 I= 57378+03
 U= 54333+03 M= 16362+02 Cp= 63427+00 k= 10331+01 Cp''= 26496+02
 k''= 22895+01 A= 17730+03 Mu= 45279-04 Lt= 49227-01 Lt''=-51932-01
 MM= 61117+02 Cp.r= 66259+00 k.r= 13787+01 MM.r= 45682+02 R.r= 18201+03
 Z= 88846+00 Пл= 00000-00 Вm= 10807-02

Содержание компонентов - объем. (масс.) доли

O 71773-05 O2 12516-05 N2 15543+00
 NO 13276-05 CO 25446+00 CO2 36841-01
 k*Fe 67848+00 Fe 39127+00 FeO 77320-04
 k*Co 26090-01 Co 14851+00 CoO 11601-04
 Cr 21169-03 CrO 27796-04 CrO2 35093-04
 k*Cr2O3 55442-01 k*Mo 46805-01 MoO2 24384-03
 MoO3 25332-02 Mo2O6 10208-04 k*W 55582-01
 WO2 33170-05 WO3 97305-04 W2O6 12757-02
 W3O8 63926-04 W3O9 69598-04 VO 35884-05
 VO2 83435-02 k*V2O3 26060-01 V4O8 46560-03

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-07 T= 15500+04 V= 49483+07 S= 55772+01 I= 57691+04
 U= 55711+04 M= 16524+02 Cp= 44646+00 k= 14006+01 Cp''= 46135+01
 k''= 11010+01 A= 46184+03 Mu= 41940-04 Lt= 28527-01 Lt''= 16184-01
 MM= 60520+02 Cp.r= 44256+00 k.r= 15230+01 MM.r= 54710+02 R.r= 15198+03
 Z= 15975+00 Пл= 00000-00 Вm= 46232-03

Содержание компонентов - объем. (масс.) доли

O 11245-04 O2 82479-06 N2 24710-01
 NO 54441-06 CO 43817-01 CO2 24942-02
 Fe 85316+00 FeO 93745-04 Co 52434-01
 CoO 22710-05 Cr 33568-02 CrO 20620-03
 CrO2 98905-04 Cr2O2 10989-06 k*Cr2O3 51219-01
 k*Mo 46465-01 MoO 62650-06 MoO2 15034-03
 MoO3 52428-03 Mo2O6 15452-06 k*W 56787-01
 WO2 23124-05 WO3 22626-04 W2O6 16551-04
 W3O8 15810-06 VO 26405-04 VO2 18604-01
 k*V2O3 52817-02 V4O8 26145-03

Расчет фазового и химического состава при давлении P= 0.000000004 МПа

<Step<noion<pr>
 p=0.000000004, t=1200,50,1550,
 (1.12%N2), (4.23%O2),
 (4.0%Cr), (5.0%Co), (5.0%Mo),
 (77.1%Fe),
 (4%K*VC),
 (18%K*Fe4W2C);

Брутто-формула раб.тела: N .829049 O 2.74116 CR .797605 CO .879646
 MO .540341 FE 14.3137

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-08 T= 12000+04 V= 10357+07 S= 15226+01 I=-26730+03
 U=-27144+03 M= 16547+02 Cp= 65213+00 k= 10053+01 Cp"= 66195+00
 k"= 10060+01 A= 64503+02 Mu= 44413-04 Lt= 76351-01 Lt"= 76954-01
 MM= 60434+02 Cp.r= 11993+01 k.r= 13281+01 MM.r= 28067+02 R.r= 29625+03
 Z= 98835+00 Пл= 00000-00 Bm= 32134-10

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2 99830+00 k*Fe 77343+00 Fe 12996-02
 k*FeO 33340-01 k*Co 51832-01 Co 35324-03
 k*Cr2O3 60614-01 k*MoO2 69128-01 MoO3 48255-04

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-08 T= 12500+04 V= 10865+07 S= 15715+01 I=-20740+03
 U=-21175+03 M= 16547+02 Cp= 65848+00 k= 10053+01 Cp"= 70486+00
 k"= 10089+01 A= 65927+02 Mu= 45512-04 Lt= 78278-01 Lt"= 82245-01
 MM= 60434+02 Cp.r= 11955+01 k.r= 13260+01 MM.r= 28289+02 R.r= 29392+03
 Z= 98817+00 Пл= 00000-00 Bm= 25971-09

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2 99131+00 k*Fe 71298+00 Fe 64885-02
 k*FeO 11096+00 k*Co 51794-01 Co 18925-02
 k*Cr2O3 60614-01 k*Mo 51828-01 MoO2 36376-05
 MoO3 29137-03 Mo2O6 88956-05

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-08 T= 13000+04 V= 11655+07 S= 16016+01 I=-16892+03
 U=-17359+03 M= 16547+02 Cp= 66751+00 k= 10054+01 Cp"= 87136+00
 k"= 10257+01 A= 67791+02 Mu= 46288-04 Lt= 78143-01 Lt"= 97114-01
 MM= 60434+02 Cp.r= 11541+01 k.r= 13267+01 MM.r= 29259+02 R.r= 28417+03
 Z= 98738+00 Пл= 00000-00 Bm= 18291-08

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2 96109+00 k*Fe 71253+00 Fe 28558-01
 k*FeO 11085+00 FeO 28928-05 k*Co 51615-01
 Co 88780-02 k*Cr2O3 60614-01 k*Mo 51778-01
 MoO2 23415-04 MoO3 13965-02 Mo2O6 45449-04

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-08 T= 13500+04 V= 13777+07 S= 16451+01 I=-11118+03
 U=-11669+03 M= 16547+02 Cp= 67608+00 k= 10061+01 Cp"= 16534+01
 k"= 11387+01 A= 72787+02 Mu= 45999-04 Lt= 70846-01 Lt"= 14674+00
 MM= 60434+02 Cp.r= 99738+00 k.r= 13375+01 MM.r= 33041+02 R.r= 25165+03
 Z= 98378+00 Пл= 00000-00 Bm= 12316-07

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

N2 84432+00 k*Fe 71056+00 Fe 11238+00
 k*FeO 11030+00 FeO 16965-04 k*Co 50770-01
 Co 37004-01 CoO 22211-05 Cr 47551-05
 CrO2 30938-05 k*Cr2O3 60614-01 k*Mo 51535-01
 MoO2 13071-03 MoO3 59304-02 Mo2O6 20430-03

Характеристики равновесия - СИ

P= 40000-08 T= 14000+04 V= 28535+07 S= 18123+01 I= 12098+03
 U= 10957+03 M= 16546+02 Cp= 67078+00 k= 10123+01 Cp"= 14077+02
 k"= 23424+01 A= 10631+03 Mu= 42931-04 Lt= 44716-01 Lt"= 24004-02
 MM= 60437+02 Cp.r= 63089+00 k.r= 13922+01 MM.r= 46784+02 R.r= 17773+03
 Z= 95413+00 Пл= 00000-00 Bm= 12799-06

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

O 80084-05 O2 28591-05 N2 42275+00
 NO 19599-05 k*Fe 69525+00 Fe 40018+00
 k*FeO 10576+00 FeO 87376-04 k*Co 43008-01

Co	15284+00	CoO	13251-04	Cr	27953-04
CrO	59387-05	CrO2	19265-04	k*Cr2O3	60610-01
k*Mo	49498-01	MoO2	64252-03	MoO3	22602-01
Mo2O6	81899-03	Mo3O9	71486-05		

Характеристики равновесия - СИ

P=	40000-08	T=	14500+04	V=	48619+08	S=	60826+01	I=	62104+04
U=	60159+04	M=	16543+02	Cp=	45015+00	k=	14244+01	Cp''=	75176+00
k''=	12459+01	A=	49192+03	Mu=	39851-04	Lt=	25076-01	Lt''=	24051-01
MM=	60447+02	Cp.r=	42332+00	k.r=	15099+01	MM.r=	58163+02	R.r=	14295+03
Z=	61792-01	Пл=	00000-00	Bm=	65834-05				

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

O	26844-04	O2	71354-05	N2	25698-01
NO	10009-05	Fe	88717+00	FeO	19838-03
Co	54528-01	CoO	48318-05	Cr	23435-03
CrO	41867-04	CrO2	89883-04	k*Cr2O3	60165-01
k*Mo	16270-02	MoO	90791-06	MoO2	14905-02
MoO3	30073-01	Mo2O6	43838-03	Mo3O9	17025-05

Характеристики равновесия - СИ

P=	40000-08	T=	15000+04	V=	50466+08	S=	61174+01	I=	62618+04
U=	60599+04	M=	16565+02	Cp=	45029+00	k=	14263+01	Cp''=	86387+00
k''=	12175+01	A=	49531+03	Mu=	40881-04	Lt=	25768-01	Lt''=	24475-01
MM=	60368+02	Cp.r=	42416+00	k.r=	15076+01	MM.r=	58217+02	R.r=	14282+03
Z=	57740-01	Пл=	00000-00	Bm=	19402-04				

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

O	83048-04	O2	16757-04	N2	25610-01
NO	19718-05	Fe	88416+00	FeO	20217-03
Co	54344-01	CoO	49121-05	Cr	17007-02
CrO	25840-03	CrO2	37749-03	CrO3	99941-07
k*Cr2O3	57740-01	MoO	28320-05	MoO2	25408-02
MoO3	30544-01	Mo2O6	14840-03	Mo3O9	21110-06

Характеристики равновесия - СИ

P=	40000-08	T=	15500+04	V=	52394+08	S=	61600+01	I=	63270+04
U=	61174+04	M=	16609+02	Cp=	45030+00	k=	14291+01	Cp''=	20318+01
k''=	11190+01	A=	48276+03	Mu=	41937-04	Lt=	26562-01	Lt''=	22862-01
MM=	60207+02	Cp.r=	42626+00	k.r=	15035+01	MM.r=	58246+02	R.r=	14275+03
Z=	52804-01	Пл=	00000-00	Bm=	14176-03				

Содержание компонентов - объем.(масс.) доли

O	53740-03	O2	18838-03	N2	25486-01
NO	83559-05	Fe	87973+00	FeO	46198-03
FeO2	92891-07	Co	54081-01	CoO	11194-04
Cr	32128-02	CrO	94319-03	CrO2	21622-02
CrO3	11230-05	Cr2O2	22992-06	k*Cr2O3	52804-01
Cr2O3	17435-06	MoO	16345-05	MoO2	18745-02
MoO3	31241-01	Mo2O6	54869-04		

ВЫВОДЫ

1. Изучено влияние термической обработки на физико-химические и физико-механические свойства быстрорежущих сталей Р18, Р6М5, Р6М5К5, а также теория их легирования.
2. Состояние исследуемой проблемы проанализировано по литературным данным и по сайтам Интернет - термической обработки инструментальных сталей в вакууме и оборудования для термической обработки.
3. На основе анализа и исследований выявлено, что данное научное направление является новым и исследования в этой области не проводились.
4. Разработана термодинамическая модель термической обработки быстрорежущих сталей Р18, Р6М5К5 в вакууме.
5. Исследованы фазовые превращения в быстрорежущих сталях при вакуумно-термической обработке в зависимости от технологических режимов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Синярев Г. Б., Ватолин Н. А., Трусов Б. Г., Моисеев Г. К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. М.: Наука, 1982. 264 с.
2. Болгар А. С., Литвиненко В. Ф. Термодинамические свойства нитридов. Киев: Наукова думка, 1980. 284 с.
3. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: В 4т./ Гурвич Л. В., Вейц И. В., Медведев В. А. и др. М.: Наука, 1982.
4. Barin J., Knacke O. Thermochemical properties of inorganic substances. Berlin: Springer – Verlag, 1973. 921 p.
5. JANAF Thermochemical tables: 2–nd edition.NSRDS – NBS 37 – Washington: US GOV. Print. Offise, 1971. 1141p.
6. Schick H. L. Thermodynamiks of certain refractory compounds. V. 1–2. N–Y.– London: Acad. Press, 1966.
7. Кубашевский О., Оллокк С. Б. Металлургическая термохимия /Пер. с англ. под ред. Л. А. Шварцмана. М.: Металлургия, 1982. 390 с.
8. Куликов И. С. Термическая диссоциация соединений М.: Металлургия, 1969. 576 с.
9. Морачевский А. Г., Сладков И. Б. Термодинамические расчеты в металлургии: Справ. изд. 2–е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1993. 304 с.
10. Морачевский А. Г., Сладков И. Б. Физико–химические свойства молекулярных неорганических соединений. Л.: Химия, 1987. 192 с.
11. Рузинов Л. П., Гуляницкий Б. С. Равновесные превращения металлургических реакций. М.: Металлургия, 1975. 416 с.
12. Свойства элементов. В двух частях. Ч.1. Физические свойства. Справочник/ Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия.1976. 600с.
13. Августиник А. И., Орданьян С. С., Фищев В. Н., Кудряшева Л. В.// Изв. АН СССР. Неорган. материалы. 1973. Т.9 №7. С. 1169 – 1171; №8. С. 1358 – 1361.
14. Агафонов В. Д., Гутикова Н. Н. Комбинированное упрочнение ре–жущего инструмента нанесением покрытий методом КИБ с последующим эпиламиранием // Двигателестроение. 1989. №4. С. 36–37.
15. Адамовский А. А. Исследование абразивных свойств и взаимодей–ствия тугоплавких инструментальных материалов с обрабатываемыми поверхностями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1975. 27с.
16. Адамовский А. А., Карюк Г. Г. Влияние характера связи в бескис–лородных тугоплавких соединениях на их свойства в процессах абразивной обработки// Физико–химические свойства тугоплавких соединений и сплавов: Сб. научных работ. Киев: Институт сверхтвердых материалов, 1981. С. 107–114.
17. Айвазов М. И., Резчикова Т. В., Дегтярова В. Ф. Синтез твердых растворов в системах TiN–CrN и VN–CrN // Неорганические материалы. 1975. Т.11. №2. С. 242–244.
18. Андриевский Р. А., Ланин А. Г., Рымашевский Г. А. Прочность тугоплавких соединений. М.: Металлургия, 1974. 232с.
19. Андриевский Р. А., Уманский Я. С. Фазы внедрения. М.: Наука, 1977. 239с.

20. Анализ поверхности методами Оже– и рентгеновской фотоэлектрон–ной спектроскопии.
Под ред. Д. Бриггса и М. П. Сиха. М., Мир, 1987. 598с.