

## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННЫХ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

М.В. Радченко, Т.Б. Радченко, Ю.О. Шевцов, В.С. Киселев, О.И. Хомутов

*В работе представлен анализ основных параметров комбинированных способов создания защитных покрытий и технологические рекомендации по их получению.*

*Ключевые слова: основные параметры, защитные покрытия, комбинированные способы, технологические рекомендации.*

В принципе, создание высокоэффективного покрытия на деталях машин возможно за одну технологическую операцию. Однако такая технологическая операция должна содержать достаточно много целевых функций, включающих такие самостоятельные процессы, как:

- физическое формирование объема (массы) покрытия из инородного по отношению к подложке (детали) состава, как правило, с существенно отличающимися свойствами материала от материала подложки;

- обеспечение плотности покрытия, образованного из отдельных частиц (чаще всего порошковых, ионно-капельных фракций и др.) с минимально необходимой пористостью;

- обеспечение оптимального переходного слоя от подложки к покрытию;

- предотвращение появления в процессе формирования и последующего охлаждения покрытий трещин и микротрещин (в том числе за счет различий в коэффициентах термического расширения и усадки);

- обеспечение необходимого материалovedческого состояния покрытия, одинакового по сечению или с контролируемым градиентом.

Как видно, этот далеко не полный перечень задач, которые целесообразно было бы осуществить для создания идеального покрытия. При этом весь этот комплекс для получения идеального защитного покрытия содержит процессы, которые невозможно провести одновременно в ходе одной технологической операции. Это объясняется тем, что режимы их оптимизации требуют создания противоречивых условий, включающих различные абсолютные температуры, скорости их изменения и рабочие атмосферы, в которых целесообразно проводить некоторые из рассмотренных процессов.

Таким образом, необходимо сформировать следующее научное положение: много-

численные одностадийные высокоэффективные технологии нанесения защитных покрытий, обеспечившие при их разработке и использовании очевидный прорыв в улучшение эксплуатационных качеств деталей машин за счет одностадийности решения задачи формирования покрытий, исчерпали возможности существенного развития.

Для выхода из сложившегося положения целесообразно рассмотреть вопрос о двухстадийной технологии. На ее первой стадии обеспечивается собственно формирование покрытия на детали с самостоятельными параметрами оптимизации качества первой стадии. А на второй стадии за счет изменения режимов, способов и параметров оптимизации - решение задачи управления конечным качеством не только самого покрытия (включая изменения свойств его поверхности), но и области сопряжения покрытия с подложкой и конечными свойствами самой подложки. Это возможно осуществить с использованием последующей термообработки высокоэнергетическими источниками нагрева, обеспечивающими не только интенсивный нагрев, но и оптимизацию за счет оперативного управления скоростью нагрева. К таким известным источникам нагрева можно отнести лазерный нагрев, плазменный нагрев при атмосферном давлении, вакуумный плазменный нагрев, электроннолучевой нагрев и импульсный индукционный нагрев. Все перечисленные методы электронного нагрева объединяются тем, что они могут обеспечивать плотность энергии на поверхности нагрева в диапазоне от  $1 \cdot 10^4$  до  $1 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> и независимое от технологии введение мощности в покрытие. Отличие заключается в том, что часть из этих устройств могут работать при атмосферном давлении, а часть при пониженном давлении (вакуумный плазменный в диапазоне 1 -  $1 \cdot 10^{-3}$  мм. рт. ст., электроннолучевой -  $1 \cdot 10^{-2}$  -  $1 \cdot 10^{-5}$  мм. рт. ст.).

*ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №2/2 2011*

## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННЫХ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Для выбора метода нагрева необходимо провести анализ взаимодействия уже нанесенного покрытия с атмосферой или вакуумом при температурах нагрева, приближающихся к температурам плавления веществ, из которых сформировано покрытие, переходный слой и подложка (деталь).

Рассматривая широкий перечень возможных электротехнологических процессов, которые возможно проводить при вторичной обработке покрытий, выделим три температурных диапазона. Эти диапазоны в принципе охватывают режимы, при которых происходят структурно-преобразовательные процессы в покрытиях. Для сравнительного анализа необходимо использовать в качестве параметра относительную температуру, которая выражается как отношение рабочей температуры  $T_{\text{раб}}$  к температуре плавления  $T_{\text{пл}}$  основного или изучаемого технологического материала в покрытии, т. е.  $T_{\text{раб}}/T_{\text{пл}}$ .

Тогда первый диапазон температур охватывает режимы нагрева в интервале относительных температур 0,45-0,65, при которых возможно осуществить процессы рекристаллизации, снятия напряжений, дегазации, изменения химического состава поверхности покрытия и т. д.

Второй диапазон температур, соответствующий 0,8-0,9 относительной температуры, может обеспечить большую часть процессов первого диапазона и дополнительно процессы спекания, снижение трещин, пористости и др.

Третий диапазон относительных температур ( $T_{\text{раб}}/T_{\text{пл}} \geq 1,0$ ) позволяет осуществлять частичное или полное расплавление покрытия.

Такое последовательное изменение исследуемых диапазонов тесно взаимосвязано с однотипностью последовательных процессов, протекающих в покрытиях. При этом, по мере увеличения конечной температуры, скорости протекающих процессов могут существенно увеличиваться.

В качестве модельных веществ выберем нагрев металлов группы VI-a периодической системы Д. И. Менделеева. Выбор именно этой группы металлов определяется двумя причинами. Первая связана с тем, что полученные результаты можно с большим уровнем достоверности использовать для характеристики процессов в других металлах, а вторая причина обусловлена достаточно высоким уровнем изученности этой группы металлов по динамике нагрева и, следовательно, возможности привлечения для анализа не

только результатов данной работы, но и других авторов.

Для определенности конкретизируем выбранные материалы VI-a группы: хром, молибден, вольфрам. Использование в качестве модельного металла хрома определяется характеристикой большого круга состава покрытий, включающих, кроме хрома, никель, железо, интерметаллиды и других вещества. Специфика поведения таких покрытий при нагреве в вакууме определяется наличием в них хрома, который характеризуется высокой упругостью пара. Результаты испарения хрома с поверхности сплавов в процессе нагрева и выдержки (2 часа) при конкретных температурах приведены в таблице 1 [2]. Для хрома принятые диапазоны относительных температур определяют абсолютные диапазоны температур: первый 710...1150<sup>0</sup>С, второй 1475...1690<sup>0</sup>С и третий – выше 1877<sup>0</sup>С.

Анализируя данные таблицы 1, можно сделать целый ряд выводов:

- длительная выдержка в первом диапазоне температур ( $T_{\text{раб}}/T_{\text{пл}} = 0,52-0,63$ ) приводит к существенному снижению хрома на глубину до 30-50мкм;

- максимальное снижение содержания соответствует большому исходному содержанию хрома – 17 %;

- предотвратить потерю легколетучих составляющих возможно только одним технологическим путем – посредством резкого сокращения времени пребывания покрытия в нагретом состоянии;

- рассматриваемый процесс снижения содержания хрома подчиняется законам диффузионной кинетики, и расчет по этим методикам обеспечивает качественную достоверность результатам.

Переходя к анализу поведения молибдена и вольфрама при их термической обработке, обратимся к анализу режимов термической обработки этих металлов, широко представленных в литературе и приведенных в таблице 2.

Укажем диапазоны абсолютных температур для рассматриваемых металлов в соответствии с принятой классификацией температурных диапазонов. Первый диапазон (0,45-0,65) для вольфрама соответствует температурам 1400...2100<sup>0</sup>С, второй (0,8-0,9) – 2650...3000<sup>0</sup>С, а для молибдена, соответственно, 1000...1600<sup>0</sup>С и 2000...2350<sup>0</sup>С. Температуры плавления для вольфрама и молибдена приняты, соответственно, 3420<sup>0</sup>С и 2350<sup>0</sup>С.

РАДЧЕНКО М.В., РАДЧЕНКО Т.Б., ШЕВЦОВ Ю.О., КИСЕЛЕВ В.С., ХОМУТОВ О.И.

Таблица 1 - Изменение содержания хрома в стандартных сплавах при нагреве в вакууме при давлениях  $1 \cdot 10^{-3}$  мм.рт. ст.

Сплав	Температура, °С	Исх. сод. Cr, %	Содержание хрома, %, на расстоянии от поверхности, мкм												
			4	8	12	16	20	24	28	36	44	52	60	68	
2Х13	1040	14,8	12,7	13,3	13,8	14,2	14,6	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	
1Х11МФ	1060	14,0	11,3	12,5	13,0	13,4	13,6	13,8	13,9	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	
ЭИ-893	980, 1170	17,0	8,3	9,4	10,3	11,4	12,5	13,3	14,1	15,3	16,1	16,7	17	17	

Таблица 2 - Режимы термической обработки металлов группы VI-а и нержавеющей стали

Металл	Температура		Остат. давл., мм. рт. ст., газ	Цель нагрева
	°С	относит.		
Вольфрам [2...29]	До 2200	0,68		Отжиг вообще
	1000-1400	0,35-0,46	760; водород 760; аргон $10^{-2}-10^{-5}$	Отжиг после деформации и для дегазации; нагрев для предварит. спекания, насыщение бором, под штамповку, прокатку, ковку
	1400-1700	0,46-0,54	760; водород 760; аргон $10^{-4}-10^{-6}$	Рекристаллизационный отжиг, нагрев для спекания изделий с активными добавками, под ковку и частично под прессование
	2200-3000	0,68-0,9	760; водород $10^{-4}-10^{-6}$	Высокотемпературные процессы: спекание, обработка монокристаллов
Молибден [2; 5; 6; 8...10; 30...42]	450-1600	0,25-0,65	—	Отжиг вообще
	900-950	0,407-0,425	$10^{-5}$	Отжиг для предварительной дегазации жести и проволоки
	1100-1300	0,477-0,546	760; водород	
	850-1100 1100-1400	0,32-0,477 0,477-0,58	760; водород 760; водород $10^{-2}-10^{-5}$	Предварительное спекание Отжиг: для снятия напряжения после обработки давлением, для рекристаллизации проволоки и штамповок; нагрев под прокатку, ковку, прессование, штамповку
Молибден с малыми добавками Zr, Ti, V [30...32]	1300-1600	0,546-0,65	760; водород $10^{-2}-10^{-5}$	То же
	1100-1400	0,477-0,58	$10^{-3}$	Борирование. Высокотемпературные процессы вообще
	1600-2400	0,65-0,925		
	1600-2000 2000-2400	0,65-0,79 0,79-0,425	760; водород $10^{-4}$ - $10^{-5}$ ; 760; водород, $10^{-4}$	Спекание при косвенном нагреве, прямым пропусканием тока, полная дегазация, гомогенизирующий отжиг низколегированных сплавов
Хром [3,5; 43...48]	600-1000	0,4-0,63	760; воздух 760; водород 760; аргон $10^{-2}-10^{-3}$	Отжиг для снятия напряжений, для рекристаллизации, для дегазации
	1200-1600	0,675-0,86	760; водород аргон; воздух	Нагрев под прессование, прокатку, ковку
	1200-1600	0,675-0,86	760; водород	Рафинирующий отжиг
Нержавеющая сталь [6;30; 49...51]	950-1150	0,68-0,79	760; воздух $10^{-3}-10^{-5}$	Отжиг для снятия напряжений, дегазации; нагрев под закалку
	1200-1300	0,82-0,87	$10^{-2}-10^{-4}$	Спекание

Параметры режимов термической обработки рассматриваемых материалов (таблица 2) позволяют гарантировать завершенность металлографических преобразований при нагреве до приведенных температур и в принципе определяют уровень температур, до которых целесообразно вторично нагревать рассматриваемые покрытия.

Приведенные в таблицах 1 и 2 характеристики остаточного давления и газа, при которых происходят электротехнологические

процессы, позволяют провести общий анализ вероятности протекающих физических процессов взаимодействия материала с атмосферой. Эти процессы можно оценить, рассматривая термодинамические характеристики продуктов реакции с учетом интервалов температур, при которых осуществляются основные технологические процессы.

В случае взаимодействия с кислородом и кислородосодержащими газами на поверхности металлов образуются окислы. Упру-

## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННЫХ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

гость диссоциации и пара этих окислов дают представление о возникновении их при рассматриваемых температурах. Аналогично ведут себя металлы в азоте и в углеродосодержащих газах, где могут образовываться нитриды и карбиды.

Водород с этими металлами не взаимодействует ни при каких температурах. Но так как эти металлы рассматриваются как модельные, необходимо указать, что в диапазоне температур второй группы процессов практически все соединения водорода с другими металлами проходят процессы диссоциации этих соединений и приходится учитывать присутствие водорода в молекулярно-атомарном виде.

При общем анализе следует принимать во внимание возможность уменьшения массы сплавов, т. е. упругости пара металла, который в рассматриваемом интервале температур может испаряться. Известно [2...43], что каждый из этих процессов в отдельности достаточно хорошо изучен и анализируется в данной работе для формирования технических требований к оптимальным режимам электротехнологий обработки новых объектов – тонкослойных покрытий.

Термодинамические характеристики модельных металлов приведены в таблице 3. Анализ табличных данных показывает, что закономерное изменение приведенных величин хорошо коррелируется с увеличением главного квантового числа каждого элемента. Для рассматриваемых металлов прочность межатомных взаимодействий возрастает от хрома к вольфраму. Эти взаимодействия в каждом металле зависят от состояния их электронных оболочек. Чем больше в них стабильных  $d^5$  – конфигураций, т. е. чем больше их статистический вес, тем более прочная связь существует между атомами [52]. В работах [52,53] достаточно подробно и убедительно доказана эта связь. Поэтому приведем только выводы, которые следуют из этих исследований:

- просматривается четкая закономерность изменения свойств чистых металлов, их окислов, нитридов и карбидов от статистического веса атомов со стабильными  $d^5$  – электронными конфигурациями элементов;

- упругость пара металлов снижается при повышении этого параметра, что характеризует усиление прочности межатомных связей;

- увеличивается упругость диссоциации окислов и нитридов, чем подтверждается усиление связи между атомами металла и соответствующее ослабление ее между ними и кислородом или азотом;

- при диссоциации карбидов упругость пара отдельных компонентов (металла и углерода) находится в той же зависимости от статистического веса: упругость пара металла снижается, а углерода увеличивается;

- при температурах (0,45-0,65)  $T_{отн}$  давление во всех случаях зависит от статистического веса атомов линейно, при высоких температурах характер этой зависимости меняется, но незначительно. Полученные зависимости позволяют оценить неизвестную характеристику любого из элементов группы по известным свойствам других металлов этой же группы. Следует особо оговорить, что установленная закономерность справедлива в случае термодинамического равновесия системы.

Несмотря на то, что в реальной промышленной установке условие термодинамического равновесия системы поддерживать, не всегда удается, можно замедлить или даже приостановить процессы на поверхности покрытия при соблюдении следующих условий:

- парциальное давление активного газа (например, кислорода) должно быть ниже упругости диссоциации его химического соединения с металлом. Это условие позволяет обосновать рабочее давление и уровень динамического вакуума (натекание в камеру печи);

- остаточное давление установке должно быть ниже упругости пара наиболее стойкого химического соединения, которое должно быть сохранено в покрытии с минимальным изменением.

Эти отправные положения позволяют получить убедительные величины рабочих давлений, гарантирующих качество проведения практически любых новых электротехнологий. Проведем некоторый анализ этих положений в отношении к сведениям таблице 3.

Как видно, упругость диссоциации окисла хрома весьма низка, упругость пара окисла на 5...10 порядков выше, а упругость пара металла на 8...17 порядков больше.

Таблица 3 - Зависимость некоторых термодинамических функций металлов и их соединений от относительной температуры

Относ. тем-ра	Упругость диссоциации <sup>1</sup> , мм. рт. ст.			Упругость пара <sup>2</sup> , мм. рт. ст.		
	Хром	Молибден	Вольфрам	Хром	Молибден	Вольфрам
0,45	$\frac{2 \cdot 10^{-28}}{1,9 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{1,52 \cdot 10^{-12}}{400}$	$\frac{1 \cdot 10^{-7}}{-}$	$\frac{8 \cdot 10^{-18}}{1,2 \cdot 10^{-10}}$	$\frac{4,2 \cdot 10^{-8}}{1,6 \cdot 10^{-15}}$	$\frac{1,41 \cdot 10^{-4}}{8 \cdot 10^{-18}}$
0,65	$\frac{1,25 \cdot 10^{-16}}{25}$	$\frac{7 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 10^{+4}}$	$\frac{1,6 \cdot 10^{-2}}{-}$	$\frac{2,5 \cdot 10^{-9}}{1 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{1 \cdot 10^{-1}}{3 \cdot 10^{-8}}$	$\frac{55}{4 \cdot 10^{-9}}$
0,8	$\frac{2,5 \cdot 10^{-11}}{5,5 \cdot 10^{+2}}$	$\frac{5 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 10^{+5}}$	$\frac{2,5}{-}$	$\frac{1,6 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{50}{4 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{1,3 \cdot 10^{+4}}{2 \cdot 10^{-5}}$
0,9	$\frac{6,5 \cdot 10^{-9}}{2,5 \cdot 10^{+3}}$	$\frac{1,6 \cdot 10^{-1}}{2,5 \cdot 10^{+6}}$	$\frac{32}{-}$	$\frac{18 \cdot 10^{-4}}{1}$	$\frac{10^{+3}}{1,4 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{1,8 \cdot 10^{+5}}{1,6 \cdot 10^{-3}}$

<sup>1</sup> Числитель - наиболее стойкого окисла металла, знаменатель - наиболее стойкого нитрида металла.

<sup>2</sup> Числитель - наиболее стойкого окисла металла, знаменатель - металла.

Нитриды при  $T_{отн} = 0,45$  практически не образуются, поэтому поведение хрома при нагреве в вакууме зависит от упругости пара металла. При нагреве молибдена и вольфрама определяющей является упругость пара наиболее стойкого окисла. С учетом этих результатов разработаны известные рекоменда-

ции по нагреву рассмотренных металлов (таблица 4).

Как видно из таблицы 4, при рабочем давлении в камере установки давление  $p \geq 1 \cdot 10^{-3}$  мм. рт. ст. взаимодействием с кислородом, азотом и углеродом для промышленных электротехнологий можно пренебречь.

Таблица 4 - Рекомендации по выбору давлений на основе термодинамических предпосылок

Процессы термообработки	Температура		Парциальные давления, мм. рт. ст.		
	°C	Относит. °K	Кислород	Азот	Углерод
<b>Вольфрам</b>					
Высокотемпературные процессы	2600 - 3000	0,8 - 0,9	1 - 10	—	$10^{-2} - 10^{-1}$
<b>Молибден</b>					
Высокотемпературные процессы	2000 - 2350	0,8 - 0,9	$10^{-3} - 10^{-1}$	—	$10^{-6} - 10^{-4}$
<b>Хром</b>					
Отжиг	710 - 1150	0,45 - 0,65	$10^{-28} - 10^{-10}$	—	$10^{-12} - 10^{-5}$
Высокотемпературные процессы	1475 - 1690	0,8 - 0,9	$10^{-11} - 10^{-8}$	—	$10^{-3} - 10^{-1}$

Поскольку условия в рабочей камере могут существенно отличаться от равновесных, рассмотрим некоторые кинетические аспекты взаимодействия остаточных газов с металлом:

1. На поверхности возможны два конкурирующих процесса – испарение металла и образование химического соединения. Испарение металла определяется упругостью пара. Если химическое соединение образовалось при более низкой температуре и не испаряется при рассматриваемой температуре, то не исключено возникновение слоя, затрудняющего испарение металла. Под этим слоем с ростом температуры упругость пара металла способствует созданию такого давления, при котором пленка соединения может сбрасываться. Тогда металл свободно испаряется, а термодинамическое взаимодей-

ствие происходит в парах металла. Этот процесс следует рассматривать с учетом термодинамических и кинетических представлений. Он может использоваться для сохранения состава покрытия.

2. Скорости взаимодействия металлов с газами, поступающими в камеру за счет натекания или газовой выделения из различных элементов установки, а также за счет диссоциации соединений, в большинстве случаев неизвестны. Однако на примере окисления вольфрама можно представить порядок этих величин.

В области низких давлений скорость окисления пропорциональна числу соударений, т. е. давлению кислорода. В интервале давлений  $10^{-6} - 10^{-1}$  мм. рт. ст. скорость окис-

## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННЫХ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

ления пропорциональна давлению в степени 1,08 [54].

При более высоких давлениях (0,11-0,80 мм. рт. ст.) и температурах (свыше 2400<sup>0</sup>С) показатель степени снижается до 0,82.

В области средних давлений и сравнительно низких температур скорость окисления пропорциональна корню квадратному из давления, т. е. молекулы кислорода адсорбируются при равновесной диссоциации. Экспериментально полученный показатель степени [1] равен 0,59. В области высоких давлений и низких температур кислород весьма слабо влияет на скорость окисления вольфрама, т. е. образовавшаяся на металле пленка защищает последний элемент от дальнейшего окисления.

При высоких температурах (2400-2800<sup>0</sup>С) и давлениях ниже 3мм. рт. ст. [56,57] скорость окисления вольфрама уменьшается. Изменение характера этой зависимости трактуется по-разному. Одни исследователи считают, что при интенсивном испарении вольфрама (температура выше 2500<sup>0</sup>С) пары его препятствуют движению кислорода к поверхности и замедляют окисление. В этом случае вольфрам может окисляться в парообразной фазе. Другие исследователи [55] уменьшение скорости окисления с ростом температуры объясняют следующим: времени, в течение которого молекулы кислорода находятся на поверхности вольфрама, нагретого до высоких температур, недостаточно для протекания химической реакции между ними, т. е. часть молекул кислорода покидает нагретую поверхность без взаимодействия с вольфрамом. Такое явление, называемое реиспарением, наблюдается и при окислении других материалов, например, графита [53]. Эффективность взаимодействия молекул вольфрама, сталкивающихся с молекулами кислорода, практически постоянна (1-6 % в интервале давлений 10<sup>-3</sup>-10<sup>-5</sup>мм. рт. ст.) [55]. Учитывая, что это взаимодействие в области высоких температур зависит от последних сравнительно слабо (в пределах одного порядка), остаточному давлению 10<sup>-7</sup> – 10<sup>-8</sup> мм.рт.ст. может соответствовать скорость окисления 10<sup>-10</sup> – 10<sup>-11</sup>г/ см<sup>3</sup>.с.

Хотя образование окислов при охлаждении термодинамически возможно, низкие скорости окисления и высокая скорость охлаждения позволяют получить практически чистую поверхность у обрабатываемых металлов. Состав остаточных газов в камере будет зависеть от величины натекания, скорости газовой выделения из элементов печи и

садки, эффективной скорости откачки, а также количества паров масла, мигрирующих из насосов. Чтобы обеспечить безокислительный нагрев, необходимо строго регламентировать натекание.

С увеличением натекания резко возрастают расходы на эксплуатацию вакуумной системы. Отсутствие углеродсодержащих компонентов в объеме рабочей камеры обеспечивается путем вакуумирования печи с помощью безмасляных откачных средств. С повышением скорости охлаждения изделий в печи обеспечивается качественная поверхность обрабатываемого материала. Учитывая это условие, следует предусматривать конструкцию печей с камерами охлаждения, поворотными экранами, напуском и циркуляцией чистого инертного газа.

Завершая анализ рассмотренных процессов, можно сделать следующие предварительные выводы.

1. Для создания комплексных электро-технологий получения покрытий с высокими эксплуатационными свойствами необходимо использовать интенсивный источник нагрева до температур 2500-3000<sup>0</sup>С, обеспечивающих высокую скорость увеличения температуры.

2. Ограничение скорости сверху зависит от технологии термообработки, а давление остаточных газов в печи – от начальной концентрации газа в покрытии, необходимой степени дегазации и теплофизических свойств элементов, составляющих покрытия.

3. Время обработки покрытия определяется рабочей температурой и глубиной изменения структуры и свойств покрытия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schmidt J., Mai H. Electron beam curing of coatings //3th Work. Radiosot. Appl. and Process. Ind., Leipzig, 23-27 Sept., 1985. Proc. 2. Leipzig.-1986.-P.1397-1401.
2. Агате, К., Вацек И. Вольфрам и молибден/ К. Агате, И. Вацек - М.: Энергия, 1964.- 456 с.
3. Титц М., Уилсон Дж. Тугоплавкие металлы и сплавы. - М.: Металлургия, 1969.- 352 с.
4. Тугоплавкие материалы в машиностроении. Справочник. – М.: Машиностроение, 1967.- 392 с.
5. Обработка давлением тугоплавких металлов и сплавов. Справочник. - М.: Металлургия, 1967.- 268 с.
6. Фомин, В.М. Некоторые конструкции термического оборудования // В.М.Фомин.- Франция: Электротермия, 1966. вып. 50. – С. 53-60.
7. Кушталова, И.П. Рекристаллизация и дисперсионное упрочнение металлов и сплавов/ И.П. Кушталова - Киев: Наукова думка, 1969.- 124 с.

8. Гуревич, Я.Б. Горячая прокатка металлов и сплавов в вакууме: Автореф. дисс.. докт. тех. Наук/ Я.Б. Гуревич – М.: МИСиС, 1969.- 31 с.
9. Горшковский, Я. Технология высокого вакуума/ Я. Горшковский- М.: Иностранная литература, 1957.- 539 с.
10. Самсонов, Г.В. Исследование механизма взаимодействия тугоплавких металлов с бором при борировании в вакууме / Г.В. Самсонов, Г.Л. Жуковский- Порошковая металлургия,-1970, - №6 (90). - С. 44-51.
11. Мейкат Д. Д., Огден Г. Р. Настоящее и будущее тантала, вольфрама и их сплавов //Тугоплавкие металлические материалы для космической техники/ Д.Д. Мейкат, Г.Р. Огден- М.: Наука, 1966. - С. 193-221.
12. К вопросу окисления и газонасыщения металлокерамического вольфрама при нагреве и прокатке в воздушной атмосфере и в вакууме //Пластическая деформация тугоплавких и специальных сплавов. - М.: Наука, 1970. - С. 51-56.
13. Исследование влияния рекристаллизационного отжига на пластичность вольфрама марки ВА // Пластическая деформация тугоплавких и специальных сплавов. - М.: Наука, 1970. - С. 41-47.
14. Исследование рекристаллизации металлокерамического вольфрама //Пластическая деформация тугоплавких и специальных сплавов. - М.: Наука, 1979. - С. 48-51.
15. Исследование процесса прокатки вольфрама в вакууме. //Пластическая деформация тугоплавких и специальных сплавов. - М.: Наука, 1970. - С. 34-36.
16. Miller A. Tensile Evaluation of Unworked Tungsten 25% Phenium, Alloys Consolidated by Sintering Elemental powders/ Powder Metallurgy, 1968, v. 21, №11. – P. 56-62.
17. Структура и свойства крупных монокристаллов вольфрама. //Монокристаллы тугоплавких и редких металлов. - М.: Наука, 1969. - С. 50-58.
18. Павловская Е. И., Горячева З. В. Некоторые вопросы изготовления пористых изделий из вольфрама //Порошковая металлургия, 1968, №4(64) . - С. 37-40.
19. Применение монокристаллов в качестве высокотемпературных подогревателей длинных катодов // Монокристаллы тугоплавких и редких металлов. - М.: Наука, 1969. - С. 172-179.
20. Самсонов, Г.В. Исследование процесса активированного спекания вольфрама с присадками палладия / Г.В.Самсонов, В.И.Яковлев -Порошковая металлургия, 1967, -№7(55). - С. 45-49.
21. Sluglenon R. II. "Trans. Vac. Met. Conf." New York, 1962, Boston, Mass, Amer. Vac. Soc. –P. 156-173.
22. Самсонов, Г.В. Активированное спекание вольфрама с присадками никеля/ Г.В.Самсонов, В.И.Яковлев - Порошковая металлургия, 1967, №8(56) . - С. 10-16.
23. Патент США. №3328139. Кл. 29-182 (27.06.67).
24. А. С. №19187 Способ очистки вольфрама от углерода. Опубл. 26.01.67. – Бюллетень изобретений, 1967, №4. - С. 107.
25. Сравнительные исследования структуры горячепрессованного и гидроэкструдированного вольфрама //Труды Гипроцветметобработка, 1968, вып.28. - С. 18-20.
26. Фойл, Ф.А. Вольфрам и его сплавы дуговой плавки // Тугоплавкие металлические материалы для космической техники/ Ф.А. Фойл-М.: Наука, 1966. - С. 130-146.
27. Самсонов, Г.В. Активирование процесса спекания вольфрама металлами платиновой группы // Г.В.Самсонов, В.И.Яковлев -Порошковая металлургия,-1970,-№1(85). - С. 37-44.
28. Ковка вольфрама дуговой плавки. //Структура и свойства жаропрочных металлических материалов. - М., 1967. - С. 87-89.
29. Процесс прокатки вольфрама в условиях низких парциальных давлений кислорода //Прокатка металлов и биметаллов в вакууме. - М., 1968. - С. 61-64.
30. Металлы и сплавы для электровакуумных приборов. - М.: Энергия, 1969.- 600 с.
31. Исследование влияния горячей деформации в вакууме на структуру и механические свойства металлов //Технология производства и свойства черных металлов. - М.,: Металлургиздат, 1964. - С. 195-201.
32. Эспе В. Технология электровакуумных материалов. - М.,: Госэнергоиздат, 1962.- 632 с.
33. Зеликман, А.Н. Молибден/ А.Н. Зеликман/ М.: -Металлургия, -1970. - 440 с.
34. Фалалеева З.С., Данильченко А.Н. Рекристаллизация сплавов молибдена в зависимости от состава и температуры отжига //Пластическая деформация тугоплавких и специальных сплавов/ З.С. Фалалеева, А.Н. Данильченко - М.: Наука, 1970. - С. 80-86.
35. Поведение монокристаллов молибдена в потоке плазмы аргона //Монокристаллы тугоплавких и редких металлов. - М.: Наука, 1969. - С. 165-167.
36. Выращивание крупных монокристаллов молибдена в твердой фазе //Монокристаллы тугоплавких и редких металлов. - М.: Наука, 1969. - С. 11-14.
37. Патент США. №3297496. Кл. 148-11.5 (10.01.67).
38. Спекание молибденовых штабиков в печах косвенного нагрева с графитовыми нагревателями. //Применение вакуума в металлургии. - М.: Наука, 1963. - С. 213-215.
39. Горбачев, В.С. Спекание порошкового молибдена в вакуумной печи с нагревателями и футеровкой из графита /В.С. Горбачев //Порошковая металлургия. Минск: Наука, 1966. - С. 204-208.
40. Савин, А.В. Низкотемпературное спекание молибдена / А.В. Савин, Ю.А Эддук/ Цветные металлы, 1959, №5. - С. 43-62.
41. Получение компактного молибдена методами порошковой металлургии //Порошковая металлургия, 1967, №11. - С. 45-49.
42. Получение металлургических полуфабрикатов методами порошковой металлургии //Порошковая металлургия, 1967, №11. - С. 29-41.
43. Савицкий Е.М., Бурханов Г.С. Металловедение тугоплавких материалов и сплавов/

## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННЫХ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Е.М. Савицкий, Г.С. Бурханов - М.: Наука, 1967.- 323 с.

44. Самсонов, Г.В. Нитриды/Г.В. Самсонов/ - Киев: Наукова думка, 1969.- 380 с.

45. Мецкат, Р. Механические свойства ковкого иодидного хрома и сплавов на его основе / Р. Мецкат, П. Джаффи /Проблемы современной металлургии,-1958, №1(37) . - С. 83-92.

46. Spachner S. A., Rostoker W. Trans. Amer. Soc. Metals. – "The mechanical properties of borget chromium", 1958, v. 50. – P. 838-855.

47. Wain N. L. a. o. J. Inst. Met. Further Observation on Duchlity of chromium. – " Inst. Metals", 1958, v. 86, №6. – P. 281-288.

48. Термомеханическая обработка сталей с деформацией аустенита на прокатном стане //Труды ЦНИИЧМ, 1964, №7. - С. 58-66.

49. "The Wild Barfield Journal", 1970, v. 12, №96. – P. 4-8.

50. Becket F. Y., Haywood F. W. Vacuum Heat Treatment and Their Applications. – "Engineers Digest", 1965, v. 26, №2. 125 p.

51. Конструирование и расчет вакуумных систем. -М.: Энергия, 1970.- 504 с.

52. Самсонов, Г.В. Роль образования стабильных электронных конфигураций в формировании свойств химических элементов и соединений/ Г.В. Самсонов - Порошковая металлургия, 1966, №12(48) . - С. 49-57.

53. Becker I. A., Becker E. I., Brandes R. I. Reaction of Oxygen with Pure Tungsten and Tungsten Containing Carbon. – "J. Appl. Phys.", 1961, v. 32. – P. 411-423.

54. Speiser R., St. Pierre I. R. The Science and Technology om W, Ta, Mo, Nb and Their Allous. Pergamon Press, 1964, Oxford.- 436 p.

55. Сирси, А.У. Малоисследованные области высокотемпературной химии //Исследования при высоких температурах/ А.У. Сирси - М.: Наука, 1967. - С. 121-145.

56. Кофстад, П. Высокотемпературное окисление металлов/ П. Кофстад - М.: Мир, 1969.- 392 с.

172. Eisinger J. Adsorption of Oxygen on Tungsten. – "J. Chemical Physis", 1959, v. 30, №2. – P. 412-416.

57. Perkins P. A., Price W. J., Crooks D. D. T. R. 6-90-62-98 lockneed Missiles and Space Co Now. 1962 //Trans. on Vac. Technol, 1964. – P. 162-171.

**Радченко М.В.**, зав. кафедрой «Малый бизнес в сварочном производстве», АлтГТУ им. И.И.Ползунова, E-mail: [mirad\\_x@mail.ru](mailto:mirad_x@mail.ru), тел.: 8(3852) 29-07-65;

**Радченко Т.Б.**, и.о. зав. кафедрой «Автоматизированный электропривод и электротехнологии», АлтГТУ им. И.И.Ползунова, тел.:8(3852) 29-07-65, E-mail: [aepiet@mail.altstu.ru](mailto:aepiet@mail.altstu.ru);

**Шевцов Ю.О.**, проф., кафедра «Малый бизнес в сварочном производстве», АлтГТУ им. И.И.Ползунова, E-mail: [yuoshevtsov@mail.ru](mailto:yuoshevtsov@mail.ru), тел.: 8(3852) 29-07-65;

**Киселев В.С.**, зам. зав. кафедрой, ст. преподаватель кафедры «Автоматизированный электропривод и электротехнологии», АлтГТУ им. И.И.Ползунова, E-mail: [aepiet@mail.altstu.ru](mailto:aepiet@mail.altstu.ru), тел.: 8(3852) 29-07-65;

**Хомутов О.И.**, первый проректор, зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий » АлтГТУ им. И.И.Ползунова, E-mail: [homutov\\_oleg@mail.ru](mailto:homutov_oleg@mail.ru), тел.: 8(3852) 29-07-65.