

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных  
производств»

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Передовые технологии машиностроительных производств

(направленность (профиль) / специализация)

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Исследование процесса нанесения износостойких покрытий на станочные  
приспособления

Обучающийся

М.В. Бабенко

(Инициалы, Фамилия)

(личная подпись)

Научный

док. техн. наук, профессор Б.М. Горшков

руководитель

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

## Содержание

	Стр.
Введение.....	3
1 Литературный обзор.....	4
2 Исследование изменений химического состава основного материала.....	12
3 Исследование способов нанесения износостойких покрытий.....	19
4 Термическая обработка поверхности основного материала .....	55
Заключение.....	75
Список используемой литературы.....	77
Приложение А. Публикация.....	82

## Введение

Машиностроение является одной из ведущих направлений современной промышленности. В машиностроении важное значение придается технологической оснастке. От степени оснащенности машиностроительных производств приспособлениями зависит производительность этих предприятий.

Выход из строя приспособлений чаще всего происходит не из-за поломки его составных элементов, а из-за износа их поверхностей. Работа приспособлений связана с многократным трением одной поверхности об другую в течение довольно большого промежутка времени, в результате чего происходит изнашивание этих поверхностей.

Снижение коэффициента трения между взаимодействующими поверхностями возможно с помощью применения смазки, нанесением различных износостойких покрытий, упрочнением поверхностей методами пластического деформирования.

Увеличение долговечности и надежности работы машин является важной задачей современного машиностроения.

Увеличение износостойкости поверхности деталей машин может осуществляться множеством способов, которые можно разделить на две следующие группы: нанесение износостойких покрытий (то есть нанесение на поверхность другого материала, отличающегося по свойствам от материала основы) и модификация поверхностного слоя материала основы (здесь поверхностный слой материала подвергается какой-то обработке, например термической, после которой химический состав не меняется, а меняются свойства этого поверхностного слоя).

## 1 Литературный обзор

«Научное исследование – это изучение закономерностей развития явлений объективного мира и их объяснение. Научные исследования состоят из собственно научных изысканий и вспомогательных организационных мероприятий, направленных на обеспечение технических возможностей проведения таких исследований». [7]

«Строение и свойства поверхностей деталей, образующихся при обработке, оказывают значительное влияние на производительность, долговечность и надежность машин и других изделий. Изменения в строении и свойствах поверхности могут быть связаны с механическими, металлургическими, химическими и другими факторами. Эти изменения, хотя и ограничены тонкими поверхностными слоями, определяют качество изделий или могут в некоторых случаях сделать поверхность недостаточно функциональной. Понимание основных изменений в состоянии и свойствах поверхности необходимы для обеспечения требуемого качества изделий. Параметры качества поверхностного слоя определяют условия эксплуатации, в которых могут использоваться детали. Способы финишной обработки поверхности, физико-механические свойства поверхностного слоя, влияние комплекса параметров шероховатости поверхности, остаточное напряжение, деформационное упрочнение, структурно-фазовые превращения и прочее определяют эксплуатационные характеристики изготавливаемых деталей, такие как: износостойкость, усталостная прочность и коррозия под напряжением». [8]

«Работоспособность деталей машин во многом определяется свойствами материалов, из которых они изготовлены. В основном эти свойства являются объемными, но для ряда деталей важную роль играют свойства поверхности и поверхностного слоя». [8]

«Это особенно касается деталей, работающих в условиях трения и изнашивания, причем поверхности трения могут одновременно выполнять и

другие функции. Поведение материала и работоспособность изготовленных из него деталей зависят от состояния поверхностей, площади контакта с окружающей средой и взаимного контакта сопрягаемых деталей». [8]

«Поверхность может быть описана в простых терминах как внешний слой объекта. Поверхность раздела может быть определена как переходный слой между двумя или более объектами, которые различаются либо химически, либо физически, или в обоих аспектах. В науке о поверхности или поверхность раздела определяют как существующую в любой системе, которая имеет внезапное изменение системных свойств, таких как: плотность, кристаллическая структура, химический состав и др. Поверхности и поверхности раздела могут быть тщательно исследованы с использованием микроскопии высокого разрешения, доступных физических и химических методов. Для их реализации разработано и используется большое количество простых и очень сложных испытательных приборов и устройств». [8]

Для увеличения износостойкости трущихся поверхностей технологической оснастки можно использовать термическую обработку, нанесение покрытий, поверхностное легирование, деформационное воздействие, комбинированную обработку.

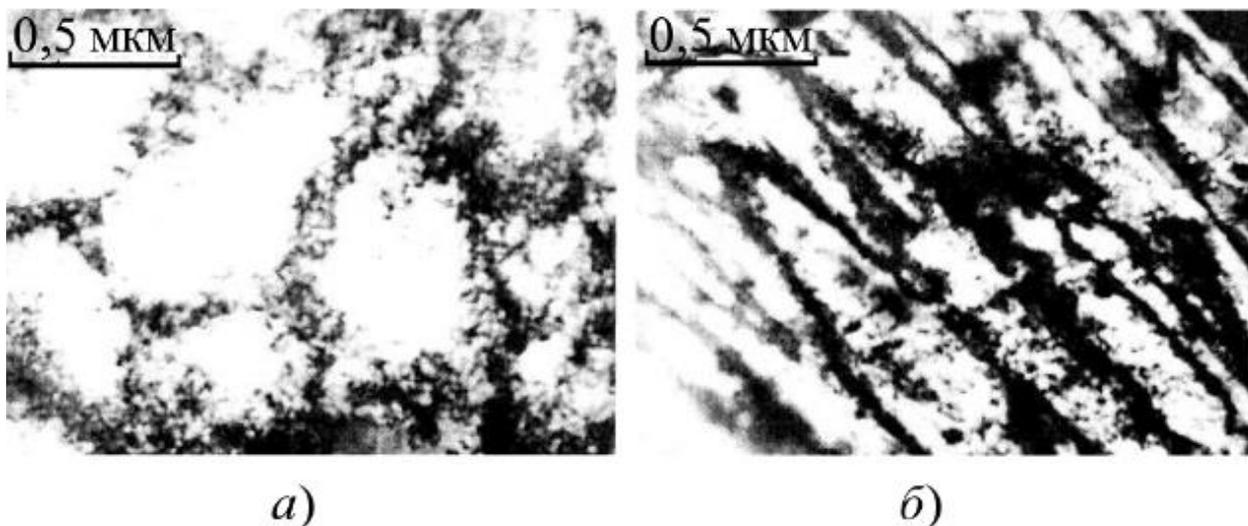
«Методы, относящиеся к различным группам, оказывают различное воздействие на поверхность и поверхностный слой. При нанесении покрытий формируется тонкая пленка. Поверхностное легирование изменяет химический состав и, как правило, структуру поверхностного слоя. Результатом термического воздействия является изменение структуры поверхностного слоя, при этом химический состав слоя остается неизменным. При деформационном воздействии происходит наклеп поверхностного слоя, изменяются его микрогеометрия и энергетический запас». [5]

«С позиции классического материаловедения применение любого из методов, обеспечивает упрочнение поверхностного слоя благодаря четырем принципиально различным механизмам (или комбинациям). Это

субструктурное, твердорастворное, поликристаллическое и многофазное растворение». [5]

«В чистых металлах увеличение сопротивления изнашиванию и разрушению осуществляется исключительно субструктурным упрочнением. Оно достигается при введении в кристаллическую решетку большого числа дефектов – дислокаций при их плотностях, достигающих до  $10^{14} \dots 10^{15} \text{ м}^{-2}$ ». [5]

«Дислокации, скользящие через хаотически расположенные неподвижные дислокации, испытывают со стороны последних сопротивление. Скользящие дислокации могут пересекать неподвижные. Благодаря упругому взаимодействию и междислокационным реакциям дислокации не сохраняют хаотического расположения, а создают различные субструктуры, отличающиеся определенным порядком в их расположении. Электронно-микроскопическое изображение некоторых типов дислокационных субструктур представлено на рисунке 1». [5]



*a* – дислокационные ячейки; *б* – микрополосовая субструктура ( $\times 40\,000$ )

Рисунок 1 – Увеличенное изображение некоторых типов дислокационных субструктур

«Сопротивление движению дислокации через упорядоченное расположение дислокаций (через субструктуру) отличается от сопротивления при движении через их хаотическое распределение. Если в последнем случае

оно зависит только от плотности дислокаций, то при организации субструктуры в нем сказываются параметры последней. Это явление и называется субструктурным упрочнением. Оно в основном формирует упрочнение чистых металлов». [5]

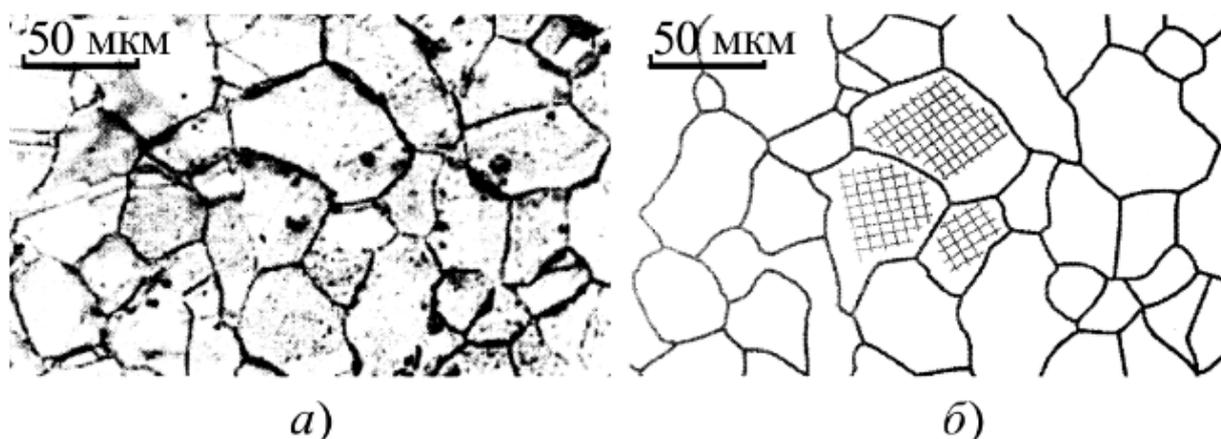
«Твердорастворное упрочнение основано на введении в кристаллическую решетку основного металла элементов замещения или внедрения. Если при введении второго элемента в кристаллическую решетку основного металла его решетка сохраняется, а атомы этого второго элемента замещают часть атомов основного элемента на их законных узлах, то в этом случае образуется твердый раствор замещения. Если же при введении второго элемента атомы его располагаются в междоузлиях кристаллической решетки основного металла и она также сохраняется, то имеют дело с твердым раствором внедрения». [5]

«При взаимодействии атомов замещения или внедрения с атомами основного металла, во-первых, может образоваться определенный порядок в расположении атомов (ближний или дальний) и, во-вторых, кристаллическая решетка основного металла искажается вследствие различного размера атомов, образующих твердый раствор. Особенно большие искажения возникают при образовании твердых растворов внедрения (например, атомы углерода или азота в сплавах железа). В процессе пластической деформации дислокации в своем движении разрушают ближний порядок в сплаве и преодолевают искажения кристаллической решетки». [5]

«Это повышает сопротивление материала изнашиванию и хрупкому разрушению. Твердорастворное упрочнение является одним из наиболее распространенных механизмов упрочнения сталей, широко используемых в технике. Примером твердорастворного упрочнения может являться введение азота в кристаллическую решетку различных сталей». [5]

«Большинство используемых на практике материалов – поликристаллы. Поликристаллическое тело (рисунок 2) состоит из областей (зерен), каждая из которых представляет собой монокристалл, но эти

отдельные монокристаллы повернуты друг относительно друга на некоторый угол (десятки градусов). Границы, разделяющие зерна, называются границами зерен. Наличие границ зерен в поликристалле приводит к его дополнительному упрочнению по сравнению с монокристаллом. С уменьшением среднего размера зерна сопротивление деформированию в большинстве случаев существенно возрастает». [5]



*a* – наблюдение зерен на поверхности материала в металлографическом микроскопе; *б* – схематическое изображение этой картины

## Рисунок 2 – Поликристаллический материал

«Ультрамелкозернистые материалы, в частности твердые сплавы, значительно лучше сопротивляются нагрузкам, возникающим в процессе эксплуатации. Это является следствием того, что мелкие зерна в своих границах накапливают большую избыточную энергию. Для ограничения их роста при повышенных температурах границы зерен закрепляют малорастворимыми частицами вторых фаз, что препятствует миграции (движению) границ и, тем самым, росту зерен. Эффективность закрепления границ зерен определяется размером частиц и объемной долей частиц второй фазы». [5]

«Многофазное упрочнение заключается чаще всего в образовании мелких выделений второй фазы в матрице основного металла или сплава. Эти выделения могут иметь ту же самую или иную кристаллическую решетку, создавать поля напряжений, быть перерезаемыми или

непроходимыми для дислокаций. В любом случае они образуют дополнительные препятствия для движения дислокаций и могут значительно повышать сопротивление изнашиванию и хрупкому разрушению материала». [5]

«На рисунке 3 можно наблюдать частицы второй фазы в алюминиевом сплаве, где также хорошо прослеживаются дислокации в виде темных линий». [5]

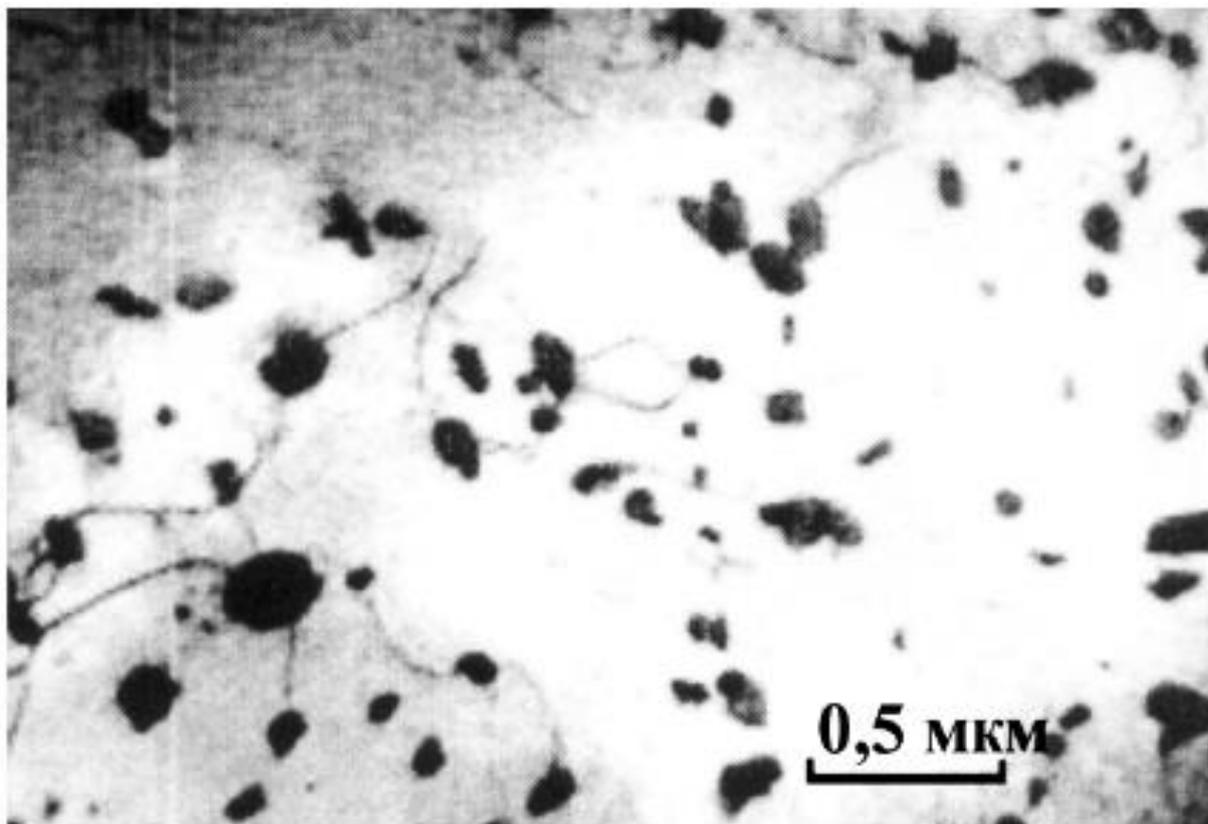


Рисунок 3 – Частицы второй фазы в алюминиевом сплаве, наблюдаемые с помощью электронной микроскопии

«В отличие от твердорастворного, субструктурного и поликристаллического многофазное упрочнение может серьезно снизить пластичность материала, что часто является существенной проблемой для практического использования таких материалов». [5]

«В широком ряду современных методов высокоэнергетического воздействия на материалы (лазерных, электронно-лучевых,

электрофизических) особое место занимают электроплазменные технологии. Основным отличием плазменных технологий от других методов воздействия на материалы является использование генератора плазмы – устройства, создающего их нейтральных веществ потоки низкотемпературной плазмы, то есть плазмы с кинетической энергией частиц, практически равной их энергии ионизации. Генераторы плазмы, работающие на газах при давлениях, сравнимых с атмосферным, называют плазмотронами. Аппарат был изобретен в начале XX в. после решения материаловедческих проблем эрозии электродов при большой плотности тока плазменной дуги за счет использования тугоплавких (как правило, вольфрамовых и гафниевых) катодных вставок и газодинамической стабилизации дуги в межэлектродном пространстве. Мощность современных плазмотронов составляет от единиц до тысяч киловатт. Сегодня плазмотронная техника и технология являются отраслью, охватывающую плазменную резку и плавку металлов, наплавку и напыление покрытий, плазмохимию, спецметаллургию, утилизацию и обезвреживание отходов, получение новых чистых материалов, нанесение пленок и покрытий вакуумно-плазменным методом и так далее. Разработано большое количество плазмотронов для самых разных целей: они применяются для нагревания газа в аэродинамических трубах и плазмохимических реакторах, при прямом восстановлении металлов из руд, интенсификации доменных и мартеновских процессов. Плазмотроны используются как инструмент для термического бурения горных пород, при спектротрических исследованиях, для получения стабильного эталона излучения, в качестве реактивных двигателей малой тяги для комических аппаратов и так далее». [3]

В данном разделе рассмотрены виды исследовательских работ, которые применяются при обосновании физических или других явлений, происходящих в материи. В данной выпускной квалификационной работе будут использованы некоторые из них.

Также рассмотрены виды модификации поверхностей и изменения физико-химических свойств материалов. Это применяется для увеличения или уменьшения тех или иных свойств материалов для получения экономических или других выгод. Применение того или иного укрупненного метода ведет к применению различных видов обработки, а это уже показывает экономическую выгоду или невыгодность применения обработки.

Способов упрочнения материалов существует большое количество. Применимость того или иного метода упрочнения зависит от вида материала, из которого изготовлена деталь.

В нашем случае рассматриваются такие средства технологического обеспечения, как станочная оснастка. Основными материалами при изготовлении станочной оснастки являются конструкционные легированные и углеродистые стали. Причем нас в большей степени интересуют детали, подвергающиеся износу. А ими являются кулачки патронов, губки тисков, цанги и так далее, то есть детали, которые непосредственно контактируют с зажимаемыми изделиями. В нашей работе будем рассматривать способы воздействия именно на конструкционные углеродистые и легированные стали.

## **2 Исследование изменений химического состава основного материала**

«При проведении теоретических исследований, основанных на принципах анализа и синтеза, широко используются методы расчленения и объединения элементов исследуемой системы. В процессе расчленения выделяются существенные и несущественные параметры, основные элементы и связи между ними. Метод объединения элементов, наоборот, подразумевает комплексный подход к изучению исследуемой системы. Такой подход используется в так называемой общей теории систем, в которой выделяют два направления. Первое связано с развитием теории как философской концепции, второе – со строгим математическим описанием закономерностей формирования и развития любых систем». [7]

«При исследовании сложных наукоемких объектов, процессов, систем применяют системный подход. В этом порядок исследования следующий:

- рассмотрение системы как целого, обладающего свойствами, отличающимся от совокупности свойств его элементов;
  - исследование элементов как самостоятельных систем, а также рассмотрение самой системы как элемента (подсистемы) другой (более сложной) системы;
  - анализ всего многообразия свойств элементов системы, отношений между ними и свойств системы в целом;
  - оптимизация структуры и процессов функционирования системы путем подчинения задач ее элементов общей цели, стоящей перед системой».
- [7]

Опыт промышленных предприятий обрабатывающей промышленности показывает, что наиболее используемыми соединениями для износостойких покрытий являются следующие:

– карбиды, нитриды, карбонитриды и другие соединения тугоплавких металлов (керамические покрытия):  $TiN$ ,  $TiCN$ ,  $(Ti,Cr)N$ ,  $(Ti,Zr)N$ ,  $(TiAl)N$ ,  $(Ti,Al)CN$ ,  $Al_2O_3$  и другие;

– тугоплавкие металлы (металлические покрытия):  $Ti$ ,  $Cr$ ,  $Zr$  и другие;

– алмазоподобные соединения (углеродные покрытия):  $Me-C:H$ ,  $a-C:H$  и другие.

В таблице 1 имеются данные о физико-механических свойствах, которые могут использоваться в качестве элементов, составляющих износостойкие покрытия. Эти химические соединения имеют довольно высокую микротвердость и соответствующие высокие температуры плавления.

Таблица 1 – Физико-механические свойства химических соединений, которые могут составлять износостойкие покрытия

Хим. соединение	Коэффициент термического расширения, $10^6 K^{-1}$	Модуль упругости, $кН/мм^3$	Твердость по шкале Виккерса, ГПа	Температура плавления, $^{\circ}C$	Плотность, $г/см^3$
1	2	3	4	5	6
Материалы с металлической связью					
$TiB_2$	7,8	560	30	3225	4,50
$TiC$	8,0...8,6	470	28	3067	4,93
$TiN$	9,4	590	22	2950	5,40
$ZrB_2$	5,9	540	23	3245	6,11
$ZrC$	7,0...7,4	400	25,6	3445	6,63
$ZrN$	7,2	510	16	2982	7,32
$VC$	7,3	430	29	2648	5,41
$VN$	9,2	460	15,6	2177	6,11
$NbB_2$	8,0	630	26	3036	6,98
$NbC$	7,2	580	18	3613	7,78
$TaB_2$	8,2	680	21	3037	15,58
$TaC$	7,1	560	15,5	39,85	14,48
$CrB_2$	10,5	540	22,5	2188	5,58
$Mo_2C$	7,8...9,3	540	16,6	2517	9,18
$W_2B_5$	7,8	770	27	2365	13,03
$WC$	3,8...3,9	720	23,5	2776	15,72
Материалы с ковалентной связью					
$V_4C$	4,5(5,6)	441	30...40	2450	2,52

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
BN (куб)	-	660	50	2730	3,48
C (алмаз)	1,0	910	80	3800	3,52
B	8,3	490	27	2100	2,34
SiC	5,3	480	26	2760	3,22
SiB <sub>6</sub>	5,4	330	23	1900	2,43
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	2,5	210	172	1900	3,19
AlN	5,7	350	123	2250	3,26
Материалы с ионной связью					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,4	400	21	2047	3,98
Al <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>	0,8	13	-	1894	3,68
TiO <sub>2</sub>	9,0	205	11	1867	4,25
ZrO <sub>2</sub>	11 (7,6)	190	12	2677	5,76
HfO <sub>2</sub>	6,5	-	78	2900	10,2
ThO <sub>2</sub>	9,3	240	95	3300	10,0
BeO	9,0	390	15	2550	3,03
MgO	13,0	320	75	2827	3,77

«По данным, представленным на рисунке 4, можно проследить качественные закономерности изменения основных физико-механических свойств нитридных, карбидных и боридных покрытий». [5]



Рисунок 4 – Сравнение физико-механических свойств нитридов, карбидов и боридов

«Соединения с бором (бориды) по сравнению с нитридами имеют более высокую твердость и более высокую термодинамическую устойчивость. В то время как нитриды имеют большую химическую пассивность (не вступают в реакцию) по отношению к большинству конструкционных материалов, так как имеют совершенно иное кристаллическое строение, что делает их более пластичными и менее хрупкими. Эти качества выделяют данные соединения и являются их преимуществом с условиях особенно высоких термосиловых нагрузок». [5]

«Тугоплавкие металлы (металлические покрытия) в инструментальном производстве обычно не используются в качестве самостоятельных покрытий. В основном их применяют в роли переходных слоев, например на границе раздела «инструментальный материал-покрытие», с целью уменьшения разницы в их физико-механических свойствах, снижения внутренних напряжений и повышения пластичности покрытия». [5]

«Алмазоподобные покрытия ( $a\text{-C:H}$ ,  $ta\text{-C:H}$  и другие) представляют собой метастабильную форму аморфного углерода, содержащего значительную долю  $sp^3$ -связей. При осаждении алмазоподобных покрытий часто осуществляют их легирование алюминием, вольфрамом, хромом, титаном и другими металлами ( $Me\text{-C:H}$ ). Эффект от применения алмазоподобных покрытий обусловлен уникальным сочетанием свойств, которыми они обладают: высокой микротвердостью, сверхнизким коэффициентом трения, химической инертностью по отношению к материалам, не содержащим железа». [5]

Рабочие поверхности тары технологического транспорта при перемещении или перевозке предметов труда, как внутри производства, так и между производствами (цехами) машиностроительного предприятия подвергаются воздействию высоких температур. Ввиду этого такие характеристики, как пределы прочности и текучести материала, из которого изготовлена технологическая оснастка, снижаются, а следствием этого

происходит деформация и разрушение материала (появляются трещины и дефекты), что приводит оснастку в негодность. [2]

При термической обработке предметов производства после нагрева их помещают в охлаждающие среды, которые обыкновенно могут иметь сложные химические составы, включая соли, щелочи, что приводит к окислению и коррозии поверхностей технологической оснастки.

«Таким образом, металл, из которого изготавливают высокотемпературную термическую оснастку, эксплуатируется в тяжелых условиях высоких температур, тяжелых садок деталей в многоместных приспособлениях. Поэтому он должен обладать:

- достаточной жаропрочностью;
  - сопротивлением циклическим нагрузкам;
  - высокой химической устойчивостью, в том числе при высоких температурах, то есть жаростойкостью».
- [2]

На сегодняшний момент такую технологическую оснастку изготавливают из жаропрочных сталей и сплавов, таких как 20X25H19C2Л, 35X18H24C2Л, 40X24H12C2Л, 35X23H7C2Л, ХН70ТЮР. [2]

Авторами [2] были исследованы жаропрочные свойства стали 35X18H24C2Л и сплава Х65НВФТ. Диаграмма состояния представлена на рисунке 5.

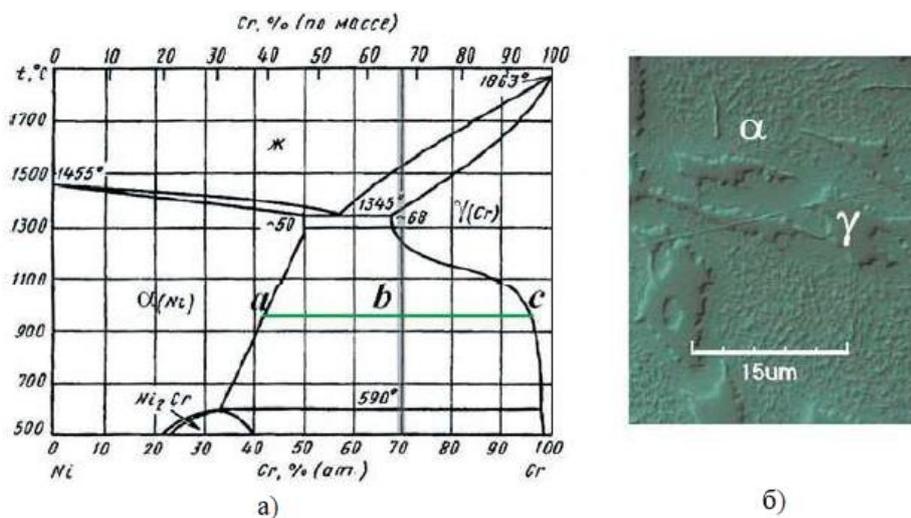


Рисунок 5 – Диаграмма состояния Ni-Cr (а), структура сплава Х65НВФТ после отжига (б)

Сплав Х65НВФТ имеет крупную зернистость. Жаропрочность выше у сплавов, у которых поверхность межзеренных границ имеет меньшую площадь [1].

«Сталь 35Х18Н24С2Л, согласно ГОСТ 977-88 закаливают от 1150°С, ниже температуры закалки быстрорежущих сталей (1210...1230°С стали Р6М5 и 1270...1290°С стали Р18), это определяет возможность фазовых превращений при нагреве, которые часто сопровождаются объемными изменениями, снижающими сопротивление циклическим нагрузкам». [17]

«Механические свойства сплава Х65НВФТ после отжига с 1300°С выше, чем у стали 35Х18Н24С2Л. При практически удовлетворительных показателях пластичности ( $\sigma_B$  и  $\sigma_T$ ) сплава Х65НВФТ в 1,5...2 раза выше, чем у стали 35Х18Н24С2Л». [2]

Величина термических напряжений определяется зависимостью

$$\sigma_{терм} = \frac{\pm \alpha \cdot E \cdot \Delta T}{1 - \mu}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;

$E$  – модуль упругости;

$\mu$  – коэффициент Пуансона.

В таблице 2 представлены механические свойства стали 35Х18Н24С2Л и сплава Х65НВФТ.

Таблица 2 – Механические свойства стали 35Х18Н24С2Л и сплава Х65НВФТ

Материал	$\psi$ , %	$\sigma_m$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{\epsilon}$ , МПа
35Х18Н24С2Л	25	294	20	549
Х65НВФТ	18	620	12	825

В связи с небольшим коэффициентом линейного расширения ( $\alpha$ ) значения термических напряжений в сплавах на основе хрома ( $Cr$ ) при одних и тех же значениях  $\Delta T$  в 2...2,5 раза ниже, чем в сплавах с железом и никелем ( $Fe+Ni$ ).

«Меньшие термические напряжения, возникающие при переменных температурных воздействиях, наряду с более высокой прочностью определяют преимущество сплавов на основе хрома перед сплавами на основе железа и никеля. Сплавы на основе хрома и позиционируются как лучший материал для работы в условиях термоциклирования вследствие высокого сопротивления термической усталости». [2]

«Длительные промышленные испытания (10 мес.) оснастки (плита размерами 600×450×20 с отверстиями для установки инструмента) подтвердили это положение. Выполняли закупку инструментов из быстрорежущей стали с нагревом в хлор-бариевой ванне. Стойкость оснастки из стали 35X18H24C2Л до полного отказа вследствие коробления плиты и заметной коррозии – 970 садок. Плита из сплава X65HВФТ выдержала закалку 1515 садок инструмента, после чего оставалась годной к использованию. Достигнутое повышение стойкости 60%. Можно прогнозировать повышение стойкости как минимум в два раза по сравнению со сталью 35X18H24C2Л». [2]

За счет описанных в этом разделе мероприятий изменением химического состава основного материала изменяются физико-механические свойства и повышается износостойкость деталей станочной оснастки.

### 3 Исследование способов нанесения износостойких покрытий

«По своей сути методы, используемые для упрочнения рабочих поверхностей, имеют существенные различия в применяемых источниках энергии (лазерный луч, низкотемпературная плазма и другие), рабочих средах (воздух, вакуум и другие) и так далее. Однако, несмотря на это, эффекты, которые могут быть достигнуты при их применении, отличаются заметным сходством и связаны с улучшением наиболее важных показателей эффективности (выходных параметров) процесса резания». [5]

«На рисунке 6 показана взаимосвязь между выходными параметрами процесса резания и физико-механическими и кристаллохимическими свойствами поверхности и поверхностного слоя». [5]

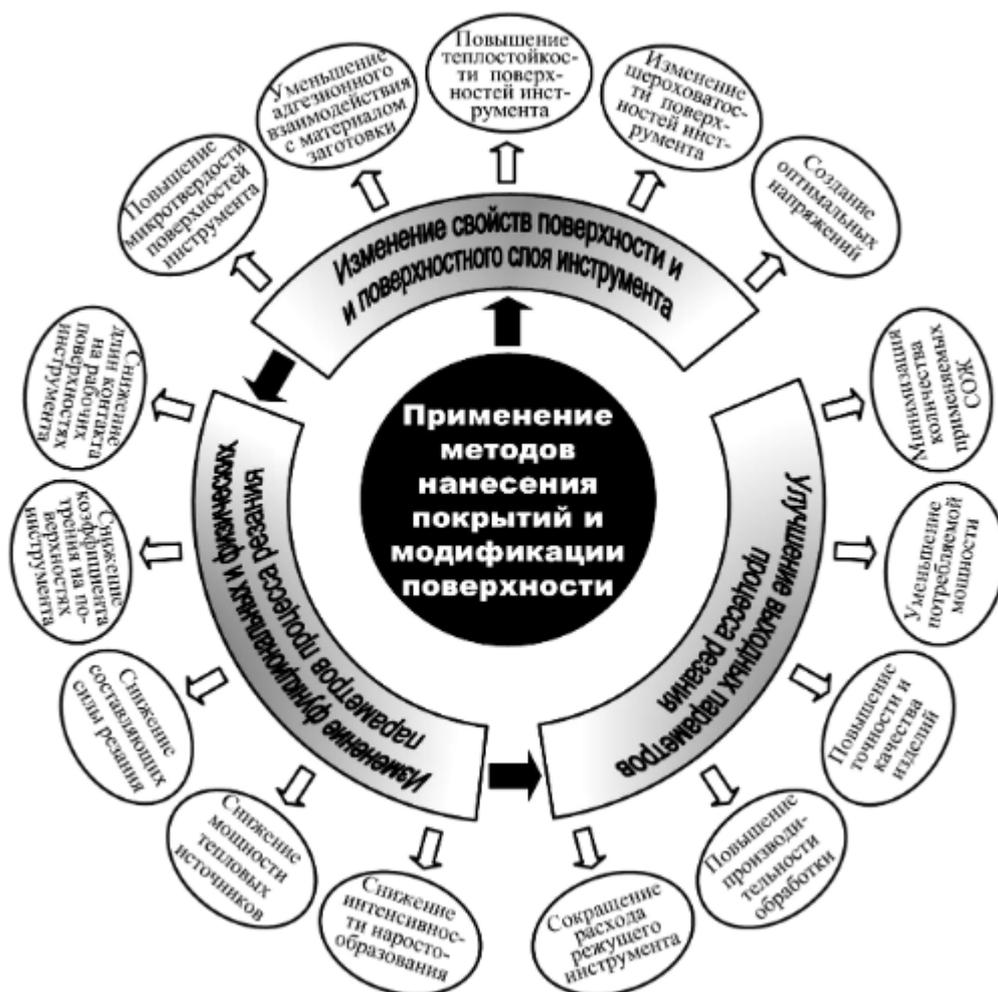


Рисунок 6 – Эффекты, достигаемые применением различных методов нанесения покрытий и модификации рабочих поверхностей

Авторами [9] предлагается для упрочнения деталей технологической оснастки применять методы вакуумно-плазменного нанесения покрытий, а также детонационно-газовый способ.

В плазменно-дуговой технологии в последнее время бурно развивается направление ионной имплантации. Эта технология заключается в обработке поверхности пучком высокоэнергетических ионов, в составе которых имеются частицы материала, которые необходимо внедрить в поверхностный слой покрываемой поверхности. Такое покрытие имеет диффузионный характер сцепления с подложкой.

Если процесс ионно-плазменного нанесения покрытия происходит в вакууме, то толщина покрытия значительно увеличивается (1...10 мкм), характер сцепления материалов покрытия и подложки является адгезионным, поэтому покрытие представляет собой новый материал, имеющий свои физико-механические характеристики, а между слоями хорошо прослеживается четкая граница.

Авторами [9] утверждается, что наиболее эффективным является гибридный способ нанесения покрытий, сочетающий ионную имплантацию и ионно-плазменный метод, который назвали методом плазмохимической имплантации. Они имеет ряд преимуществ: для него характерна глубокая газовая диффузия, достигающая 0,3 мм; хорошая диффузия материала покрытия с основным материалом; наличие четко определяемого переходного слоя.

Процесс нанесения покрытий ионно-плазменным методом имеет много параметров, каждый из которых может оказать влияние на формируемое покрытие. Например, только изменением давления в камере с вакуумом при нанесении однослойного и многослойного покрытий на основе нитрида титана можно изменить фазовый состав титана (Ti) и нитрида титана (TiN): в многослойном соответственно 15 и 85%, а в однослойном – 46 и 54%. [4]

Однослойное покрытие имеет ряд недостатков, связанных с повышенной хрупкостью, связанной с большой толщиной. Многослойное же

покрытие тоже имеет недостатки, связанные с малой толщиной слоев и с этим связана мягкость их фазы. Таким образом, имеется необходимость получения многослойного покрытия с большой плотностью, которые по фазовому составу похожи на однослойное покрытие.

Варьированием параметров нанесения многослойного покрытия из нитрида титана плазмохимическим методом было получено покрытие, состоящее из сотен тонких слоев, которые чередуются. Нанесение такого покрытия на штамповые направляющие позволило повысить их износостойкость в 2,1...2,4 раза.

Авторами [14] описывается, что применение горячей объемной штамповки возможно снижение доли материалов, идущих в стружку и повысить производительность. Также применением горячей объемной штамповки можно улучшить структуру материала изделия.

Штамповочное производство имеет одну большую проблему, которая заключается в низкой стойкости, то есть быстрому износу, а также высокой стоимости штамповой оснастки. При применении горячей объемной штамповки имеет место еще и температурный фактор, который заключается в применении рабочих температур штамповки, которые значительно превышают теплостойкость материала штамповой оснастки, и, в связи с этим, износ штамповой оснастки увеличивается. Поэтому в условиях массового или крупносерийного производств в штамповой оснастке применяют твердосплавные вставки, которые значительно повышают ее износостойкость. [14]

Применение электрошлакового переплава вместоковки при изготовлении штамповой оснастки позволяет в 1,4...3,5 раза повысить износостойкость штампов.

Применение износостойких покрытий, нанесенных различными методами модификации поверхностей штамповой оснастки, также позволяет повысить износостойкость. Так, например, применение покрытия из карбида титана повышает износостойкость штампов примерно в 2...3 раза. А

применение покрытия из нитрида титана и алюминия позволяет повысить износостойкость штампов более, чем в 4 раза.

В результате ошибок при проектировании, изготовлении штамповой оснастки и ее эксплуатации происходит появление трещин, что ведет к быстрому выходу из строя.

Моделирование процесса штамповки на стадии проектирования штамповой оснастки, подбор режимов штамповки, а также других нюансов процесса позволяет заранее спрогнозировать возможные риски и устранить их при изготовлении штамповой оснастки. На этом этапе можно исключить или хотя бы замедлить процесс появления трещин.

А вот появление усталостных трещин является более сложным процессом, который спрогнозировать куда труднее. В процессе штамповки от нагретого материала теплота передается штамповой оснастке, которая нагревается. Далее при окончании работы штампа эта оснастка остывает. Таким образом, имеется проблема цикличности нагрева и остывания штамповой оснастки, в результате чего появляются разгарные трещины. Данный негативный фактор частично устраняют предварительным нагревом штамповой оснастки перед началом работы. Но при этом есть вероятность перегрева, который снижает износостойкость штампа. [14]

Для внутреннего охлаждения штамповой оснастки применяют смазочно-охлаждающие жидкости, которые подают в специальные отверстия, заложенные конструкторами на стадии проектирования (рисунок 7). Это усложняет конструкцию штамповой оснастки.

Одним из наиболее действенных способов поддержания работоспособности штамповой оснастки является метод комбинированного адаптивного охлаждения. Он включает с себя и внутреннее и наружное охлаждение, а также контроль термодатчиками расхода СОЖ. Данный способ позволяет снизить влияние на штамповую оснастку термоциклических нагрузок.

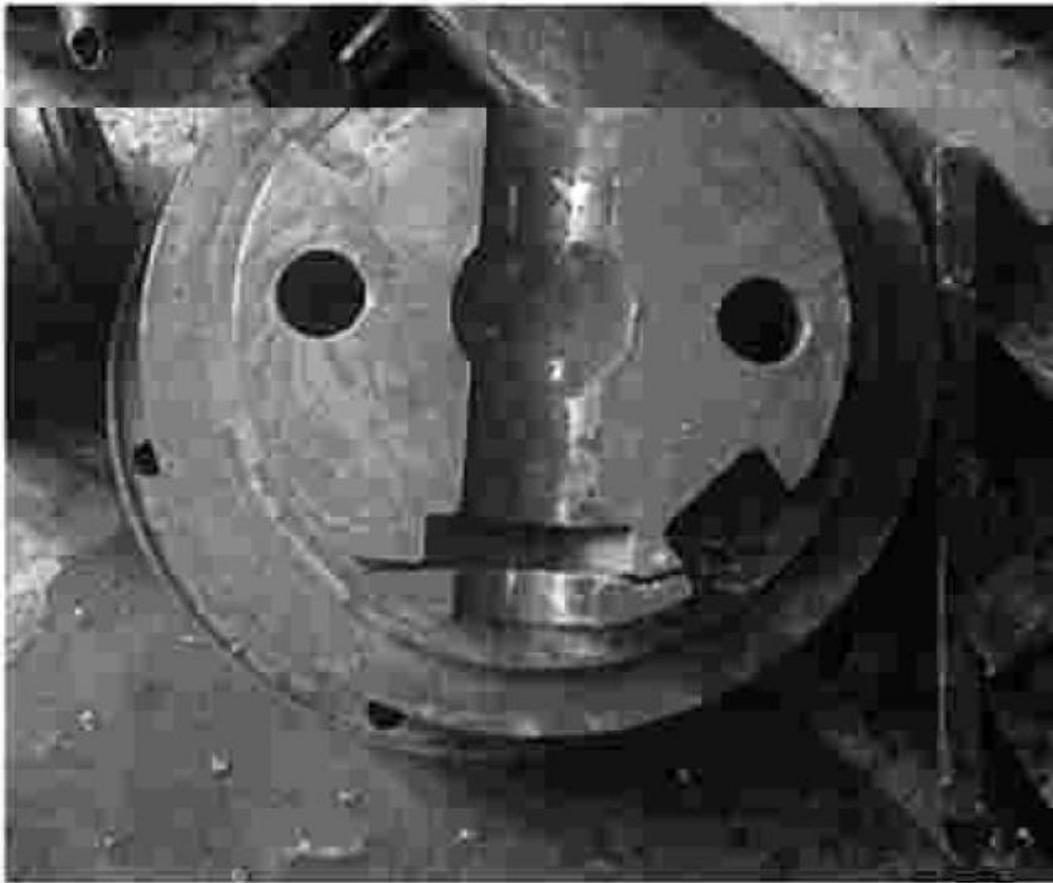


Рисунок 7 – Конструкция штамповой оснастки с отверстиями для подачи СОЖ

На стадии проектирования штамповой оснастки с применением САПР можно снизить риски быстрого выхода ее из строя путем прогнозирования течения деформируемого металла в полости штампа. [13] Путем выбора оптимальных размеров и формы заготовки можно достигнуть наиболее полного заполнения полостей штампов материалом получаемых заготовок, что снизит количество получаемого облоя и увеличит износостойкость штампа. Введение в конструкцию штампа переменного по толщине облойного мостика снижает нагрузки, что снижает износ.

На сегодняшний момент существует много способов оценки работоспособности штамповой оснастки для холодной листовой штамповки [10], а для горячей объемной штамповки эти методы мало изучены.

Авторами [14] предлагается в качестве метода контроля за состоянием штамповой оснастки для горячей штамповки использовать магнитный структурно-фазовый анализ, при помощи которого можно получить результаты диагностики штампов с наименьшим разбросом и наибольшей точностью.

«Нанесение таких покрытий, как  $Co - WC$ , происходит воздушно-плазменным напылением (APS), высокоскоростным воздушным поливом (HVAF) или высокоскоростным кислородным топливом (HVOF). Такие методы нанесения позволяют снизить пористость композитного покрытия, повысить твердость и устойчивость к адгезии». [15]

«APS (плазменное напыление) – впрыскивание порошков в плазменную струю постоянного тока, где они ускоряются, затем наносятся на подложку, где образуют покрытие (рисунок 8)». [15]

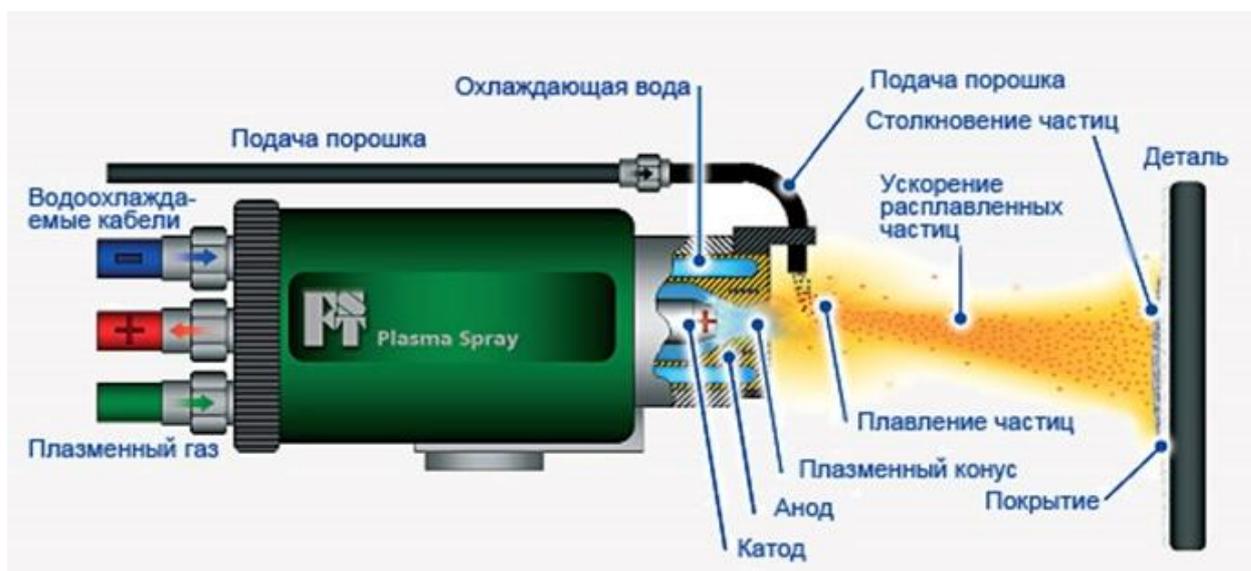


Рисунок 8 – Плазменное напыление

«Недостатком плазменного напыления является то, что он проводится при высокой температуре, при этом порошок раскаляется и частично теряет углерод». [5]

«HVOF (высокоскоростное термическое распыление кислородного топлива) – метод, основанный на смешивании кислорода и топлива, в результате чего при сжигании для получения газовой струи впрыскивается порошок, который под действием температуры и высокой скорости наносится на подложку (рисунок 9)». [15]

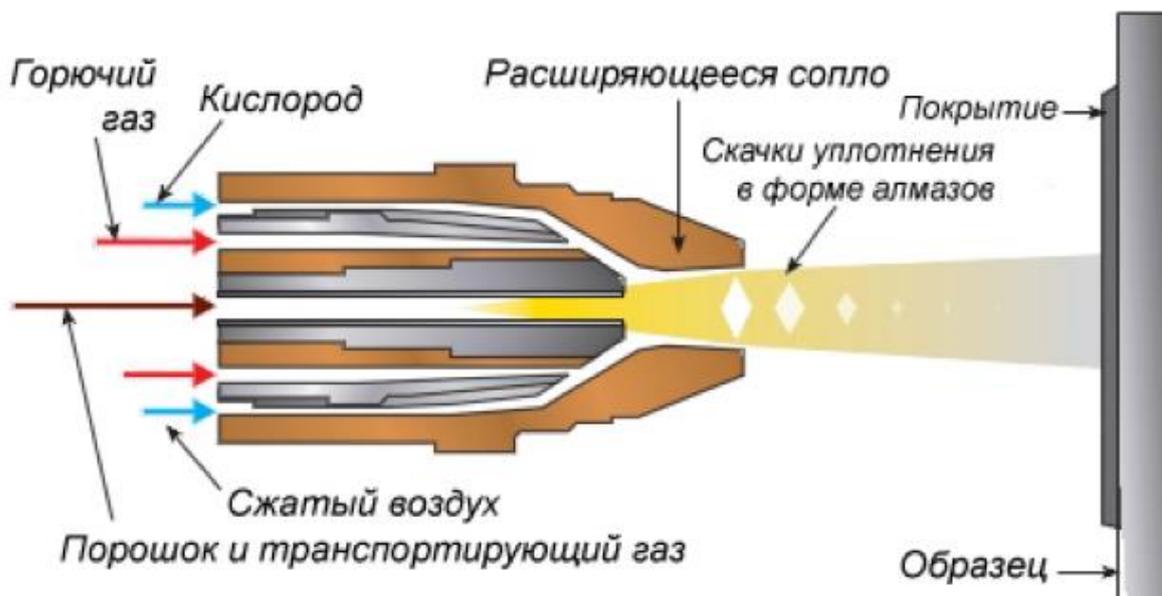


Рисунок 9 – Высокоскоростное термическое распыление кислородного топлива

«Недостатком данного метода HVOF является высокая температуры напыления, что приводит к обезуглероживанию, следовательно, покрытие может стать более хрупким, утратив свойства твердого составляющего WC. Износостойкость у покрытия стала ниже, по сравнению с обычным покрытием, так как утратилось содержание кобальтового связующего». [15]

«HVAF – метод, похожий на предыдущий, но вместо кислорода используют сжатый воздух. За счет этого снижается температура нанесения. Благодаря такому методу окисление порошка уменьшается, что сохраняет фазовой состав. Из-за более низкой температуры нанесения, чем у HVOF, покрытия, полученные методом HVAF, более износостойкие, но такой метод также не дает гарантии об отсутствии процесса обезуглероживания, что

приводит к образованию трещин [29]. Недостатком такого метода является сильная зависимость от состава порошка, несбалансированный состав которого может повлечь за собой нанесение некачественного [21] покрытия. Метод нанесения покрытия HVAF отличается тем, что при его реализации наносится сильный экологический вред окружающей среде». [15]

Электрохимическое осаждение (рисунок 10) является многоступенчатым процессом.

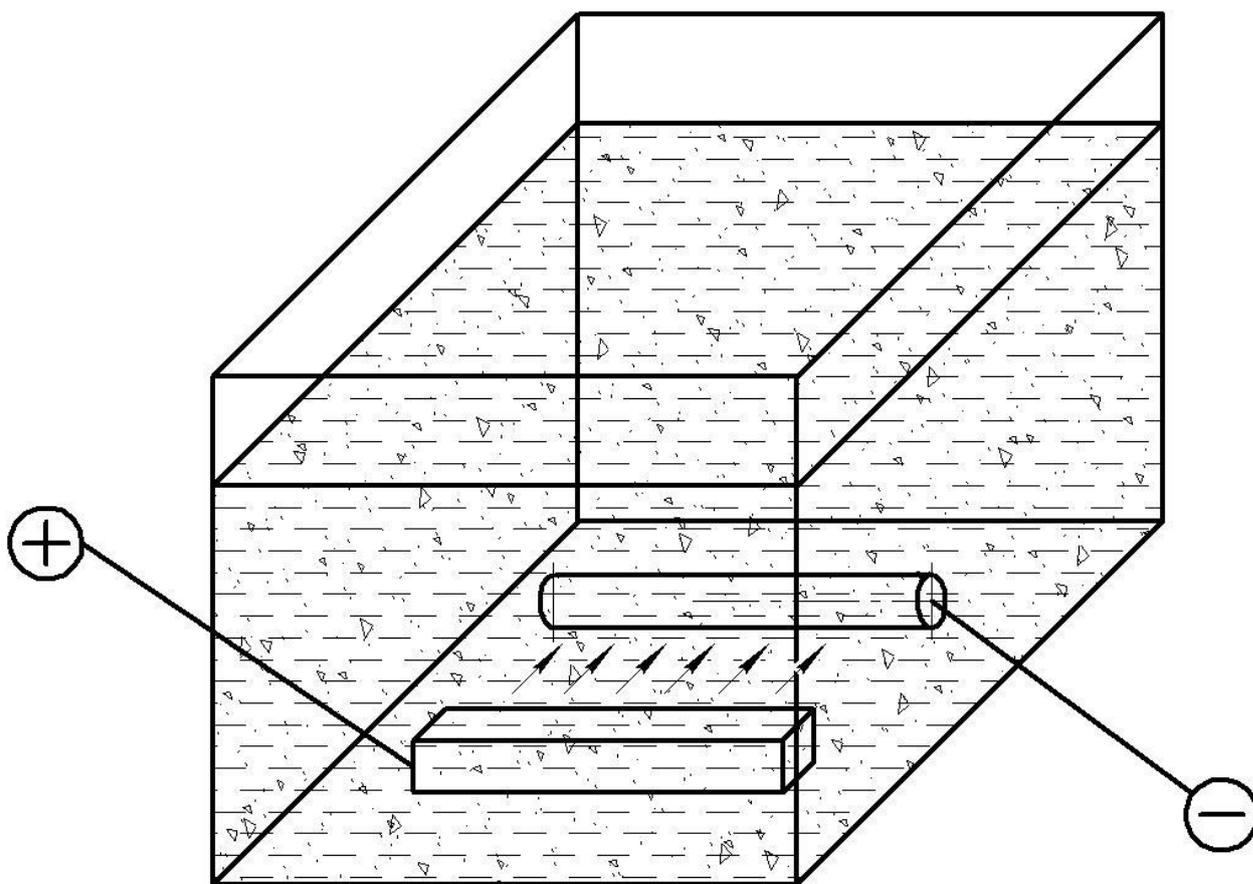


Рисунок 10 – Электрохимическое осаждение

После каждого этапа необходима промывка заготовки. Вода же должна иметь минимальную жесткость, из-за этого ее нужно часто менять. После получения покрытия деталь также промывают. Значит, в воде после промывки будет образовываться тот же раствор электролита только с меньшей концентрацией. Проблему утилизации полученного разбавленного

раствора электролита можно решить. Для этого необходимо постепенно добавлять данную воду, полученную после промывки, в гальваническую ванну, так как в ней при электролизе часть воды испаряется, поэтому необходимо пополнять ванну для достижения требуемого уровня раствора электролита. [15]

Процесс электрохимического осаждения в настоящее время получает большую популярность из-за того, что при этом способе нанесения покрытий тратится меньшее количество электроэнергии, а покрытие по качеству не уступает, а иногда даже превосходит предыдущие способы.

При электрохимическом осаждении рост катодной плотности тока от 5 до 15 А/дм<sup>2</sup> приводит к росту содержания кобальта в составе покрытия (рисунок 11).

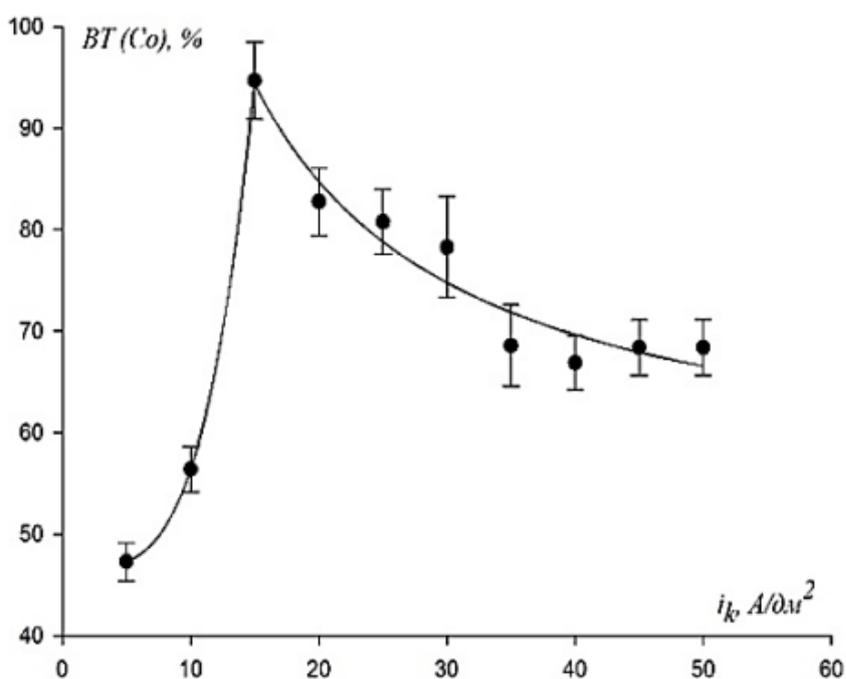


Рисунок 11 – Зависимость выхода по току от катодной плотности тока

Дальнейший рост плотности тока до 50 А/дм<sup>2</sup> снижает концентрацию кобальта и уменьшает качество образываемого покрытия. Таким образом, оптимальные показатели наблюдаются у покрытия в диапазоне плотностей тока 15...30 А/дм<sup>2</sup>. [15]

«Нанесение композитных покрытий, которые получают осаждением частиц, которые обладают антифрикционными свойствами, и препятствуют образованию коррозии и эрозии позволяет существенно снизить коэффициент трения между приспособлением и закрепляемым предметом производства, которым может быть станочная оснастка». [15]

Одним из самых распространенных материалов, используемых при нанесении износостойких покрытий, являются карбиды вольфрама (WC), соединенные кобальтовой связкой (Co). Карбид вольфрама имеет очень высокую твердость, обладает высоким сопротивлением окислению. Кобальт же, имея высокую пластичность, играет роль связки, соединяя воедино зерна карбидов вольфрама (рисунок 12).

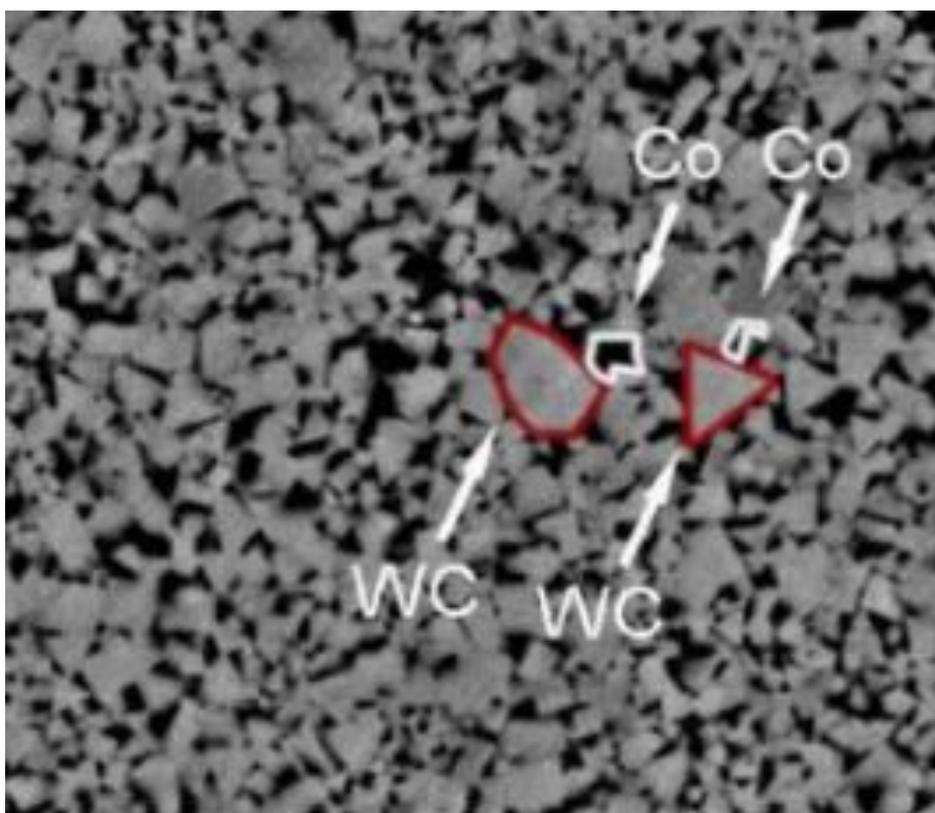


Рисунок 12 – Микроструктура вольфрамо-кобальтового твердого сплава

Износостойкость WC зависит от трех показателей: твердость, размер детали и ударная вязкость частиц вещества. Ударная вязкость напрямую не зависит от такого вида дефекта, как остаточные микропоры, возникающие в основном из-за крупных зерен WC. Было доказано, что данный показатель зависит не только от размера, но и от расположения дефекта. Низкая ударная вязкость является источником ударного разрушения. Уменьшение пористости при нанесении усиливает защитную функцию композитного покрытия при коррозии. Прочность покрытия напрямую зависит от содержания кобальта, так как размер пористых образований увеличивается при уменьшении содержания кобальта в составе покрытия. [15]

При увеличении связующего вещества в составе покрытия увеличиваются размеры зерен покрытия. Кобальт создает на поверхности покрытия пленку, способную защитить поверхность от быстрого разрушения. При нанесении покрытий на режущий инструмент в качестве связки кобальт (Co) иногда заменяют на ( $Al_2O_3$ ) чтобы придать покрытию повышенные ударную вязкость, твердость и прочность. [15]

Если деталь с покрытием, например деталь – режущий инструмент, участвует в технологическом процессе с присутствием больших температур, то связка быстро выпаривается из материала покрытия, что приводит к снижению пластичности и увеличению хрупкости покрытия. [15]

Материалы с хорошей химической инертностью, стойкостью к окислению и коррозии, а также механической прочностью востребованы во многих экстремальных условиях, таких как химические заводы, морские применения, конструкции, производственные предприятия, аэрокосмическая и автомобильная промышленность, и это лишь некоторые из них. Продукты, используемые в промышленности и сфере услуг, подвергаются воздействию экстремальных условий, таких как высокая температура, влажность, кислая, щелочная или гиперсоленая среда, ультрафиолетовое и инфракрасное излучение. Традиционно используемые материалы, такие как сплавы никеля и хрома, титановые сплавы и другие сплавы, являются дорогостоящими и

экономически нежизнеспособными для крупных установок. Экономически эффективным решением является использование керамических накладных покрытий на недорогих металлических подложках. Усовершенствованные керамические материалы обладают всеми необходимыми свойствами для увеличения срока службы подложки, используемой в экстремальных условиях. Термическое напыление является одним из таких методов, используемых для покрытия керамики, такой как цирконий, оксид алюминия, диоксид кремния, муллит, стабилизированный иттрием диоксид циркония, титан и т. д. Среди керамических материалов плавленный муллит, полученный методом плавления, является одним из возможных материалов с хорошими свойствами, такими как высокая термостойкость, низкая теплопроводность, стойкость к окислению и коррозии, химическая инертность. [19]

Муллит является подходящим материалом для использования в конструкционной керамике благодаря своей термостойкости и сопротивлению ползучести. Он имеет высокую температуру плавления  $1830^{\circ}\text{C}$ , хорошее электрическое сопротивление, хорошую механическую прочность, низкий коэффициент теплового расширения, низкую электропроводность и низкую диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon = 56,5$  при  $1 \text{ МГц}$ ), а также хорошие свойства стойкости к химическому и термическому удару. Он используется в огнеупорных изделиях, электронных устройствах, защитных покрытиях, электрических изоляторах, компонентах газовых турбин и в оптических полях.

Муллит успешно напыляется плазмой на алюминиевые подложки для двигателей внутреннего сгорания [39]. Было проведено множество исследований по использованию покрытий из керамических материалов с использованием методов термического напыления для экстремальных условий.

В одном исследовании для защиты металлических компонентов от нагрева, окисления и коррозии в агрессивных средах связующее покрытие Ni-20Cr и верхнее покрытие  $\text{CaZrO}_3$  были нанесены на подложки из

нержавеющей стали 316 методом воздушно-плазменного напыления. Нетрадиционные наноразмерные композитные покрытия SHS7170 были созданы для применения в котлах, где главную роль играет эрозия при повышенных температурах[22]. Покрытия из оксида циркония наносились на нержавеющую сталь AISI 316L, 2205 и инструментальную сталь AISI D2 методом ультразвукового распылительного пиролиза. Коррозионную стойкость покрытий оценивали в атмосфере аммиака. Было обнаружено, что циркониевое покрытие улучшает устойчивость к коррозии. Керметные покрытия на основе карбида хрома ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ) с высокой коррозионной стойкостью и износостойкостью были термически напылены на традиционные камеры сгорания с псевдооживленным слоем (FBC), работающие на экологических отходах и топливе из биомассы.

Двухслойное покрытие сплава 718/ $\text{NiCrAlY}$  наносилось на подложку из серого чугуна методом HVOF. Покрытие показало повышенную стойкость к высокотемпературному окислению и эрозии [37]. В одном исследовании титан, чувствительный к кислороду материал, был нанесен в качестве коррозионностойкого барьерного покрытия на углеродистую сталь с использованием метода холодного газодинамического напыления, и было исследовано влияние пористости на коррозионное поведение [25]. Будущим газотурбинным двигателям для более высокой эффективности потребуются усовершенствованные термобарьерные покрытия (ТВС) с более низкой теплопроводностью, более высокой стойкостью к алюмосиликату кальция и магния (CMAS) и улучшенными высокотемпературными характеристиками по сравнению с традиционными ТВС, стабилизированными иттрием диоксидом циркония (YSZ).

Двухслойные ТВС из цирконата редкоземельных металлов/YSZ были опробованы с использованием процесса плазменного напыления прекурсора раствора (SPPS) в условиях высокой температуры и влажности [23]. Композиционные покрытия из оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), армированные углеродными нанотрубками (УНТ), были напылены плазмой, и поведение

износа было исследовано при комнатной температуре (298 K), повышенной температуре (873 K) и в морской воде [18]. Метод холодного напыления отличается получением чистых и плотных металлических покрытий и наряду с защитным оксидным слоем играет важную роль в коррозионной стойкости. Были проведены исследования двух танталовых покрытий, напыленных холодным способом, для изучения микроструктурных деталей, плотности и коррозионной стойкости [24]. Недорогие трубы из углеродистой стали используются для транспортировки CO<sub>2</sub> из-за их низких скоростей коррозии в атмосфере сухого CO<sub>2</sub>. Но в присутствии жидкой воды CO<sub>2</sub> образует едкую угольную кислоту. Следовательно, для уменьшения коррозии углеродистой стали в морской воде использовался термически напыленный алюминий (TSA) [30]. Новые материалы, такие как тугоплавкие (например, W, Mo) силицидные сплавы и композиты SiC, используются для повышения устойчивости к высоким температурам. Для создания поверхности из алюмоборосилиоксида кремния, обеспечивающей повышенную стойкость к воздействию окружающей среды, было нанесено термическое напыление молибденового покрытия с последующим химическим осаждением из паровой фазы кремния и бора путем цементации упаковки [31].

В одном исследовании покрытия Ni-5Al, напыленные детонационным пистолетом, были нанесены на сплав Inconel-718 на основе Ni, и было проведено сравнительное исследование поведения высокотемпературной горячей коррозии обнаженных образцов и образцов с покрытием. Исследования проводились в средах расплавленных солей Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - 60% V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> при температуре 900°C в течение 100 циклов нагрева и последующего охлаждения [33]. В одном исследовании оценивается стойкость к окислению и горячей коррозии покрытия WC-NiCrFeSiB, напыленного высокоскоростным газокислородным топливом (HVOF), нанесенного на два сплава: на основе Ni (SuperNi75) и на основе Fe (SuperFer 800H). Образцы, как с покрытием, так и без покрытия подвергались воздействию воздуха и среды расплавленной соли (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-25% NaCl) при температуре 800°C в

циклических условиях [35]. В одном исследовании для нанесения покрытия на нержавеющую сталь использовалось высокоскоростное газокислородное напыление (HVOF). Покрытия из сплава 316L (UNSS31603) и никелевого сплава 625 (UNS N06625) на подложку из углеродистой стали. Поведение электрохимической коррозии свежеприготовленных покрытий сравнивали с соответствующими материалами в деформированной форме [34].

В одном исследовании поведение аморфных металлических покрытий FeCrMoMnWBCSi (AMC) и нержавеющей стали 304 в условиях коррозии и шламовой эрозии-коррозии (E – C) было исследовано с помощью статических электрохимических измерений и испытаний на потерю веса в условиях вращения в моделируемой морской воде. AMC преимущественно подвергаются атакам при дефектах покрытия. Превосходная устойчивость AMC к электрохимическому воздействию может быть объяснена высокой микротвердостью, легирующими элементами и аморфной микроструктурой [40]. Аморфные покрытия на основе железа считаются более эффективными для борьбы с проблемами эрозионной коррозии в оборудовании для работы с жидкостями, таком как гребные винты, рабочие колеса, насосы на боевых кораблях, подводных лодках. Процесс высокоскоростного газокислородного распыления (HVOF) считается лучшим процессом для покрытия аморфных порошков на основе железа. В этом исследовании аморфное металлическое покрытие на основе железа было нанесено на подложку из нержавеющей стали 316 с использованием метода распыления HVOF [38]. Коррозионностойкие покрытия для морских конструкционных сталей требуют непроницаемости и чистоты. К коммерческому аппарату HVOF была прикреплена система кожуха из инертного газа.

Покрытие из сплава на основе никеля Hastelloy C, сформированное на стали, продемонстрировало отличные защитные характеристики в течение 10 месяцев в ходе испытаний на морское воздействие [26]. Компоненты морской гидравлической системы часто подвергаются воздействию суровых условий окружающей среды, что может привести к ускоренному износу,

снижению функциональности, выходу оборудования из строя и дорогостоящему ремонту. Двумя основными причинами выхода из строя морской гидравлической системы являются накопление биообрастания и коррозия. Одним из современных стандартных покрытий, используемых для штоков поршней гидравлических приводов на морских судах, является покрытие из керамики, наносимое воздушно-плазменным напылением (APS), например алюминатита ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ). Три типа покрытия представляли собой новые покрытия на основе карбида высокоскоростного кислородного топлива (HVOF), а четвертое покрытие представляло собой керамическое покрытие воздушно-плазменного напыления (APS). В этом исследовании изучались противообрастающие свойства покрытий. После 20-недельного погружения в местах воздействия тропических и умеренных температур контрольная керамика APS накопила значительно больший уровень биообрастания по сравнению с покрытиями HVOF [32].

В этой работе используется метод HVOF для нанесения муллитовых покрытий толщиной 100 мкм на подложки MS со связующим слоем NiCr. Муллит химически инертен и стабилен при повышенных температурах до  $2000^\circ\text{C}$ , обладает высокой стойкостью к окислению и коррозии, не изменяется при воздействии соленых сред.

Пластины из мягкой стали (с содержанием углерода примерно 0,05-0,25%) размером  $50\times 50\times 10$  мм толщиной были обработаны по размеру, а одна грань размером  $50\times 50$  мм подвергнута пескоструйной очистке до шероховатости поверхности, составляющей среднее значение Ra 3,17 мкм. На образцы, подвергнутые пескоструйной очистке, нанесли термическим напылением связующий слой из никель-хрома и второй слой муллита с использованием технологии HVOF. Состав и свойства муллита и никель-хрома приведены в таблицах 3 и 4 ниже. Порошок никель-хрома, поставляемый компанией Powder Alloy Corporation, США; характеристики: PASC98F1 REV C НИКЕЛЬ-ХРОМ, PWA1319F: Размер частиц: от 45 до 75 мкм.

Таблица 3 – Химический состав муллита

Составляющая	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Fe_2O_3$	$Na_2O$
Содержание	78%	21,6%	0,05%	0,35%

Таблица 4 – Химический состав порошка никель-хрома

Элемент	<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Si</i>
Состав, %	0,015	19,58	0,35	0,004	78,6	1,29

В качестве исходных материалов для получения плавленного муллита стехиометрического состава  $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  использовали оксид алюминия Байера высокой чистоты, чистый кварцевый песок, горный хрусталь и плавленный кварцевый воск. Материалы были предоставлены компанией Carborundum Universal, Каламасерри (Индия). Сырье плавил в электропечи наклонного типа при температуре выше  $2000^\circ C$ , а затем разливали в формы с последующим охлаждением на воздухе до комнатной температуры, при котором происходила кристаллизация муллита. Образовавшаяся крупа имела макроразмер. Затем отливки измельчались, очищались от магнитных примесей с помощью магнитных сепараторов высокой интенсивности и сортировались по нужным размерам.

Никель-хром в соотношении 80%/20% и размером частиц 40-75 мкм выдерживали в готовом виде после сушки в печи в течение 2 часов для напыления связующего слоя. Порошок муллита, содержащий 70%  $Al_2O_3$  и 30%  $SiO_2$ , размером от 40 до 60 мкм измельчали в шаровой мельнице, смешивали и хранили в нагревательных печах в течение 2 часов перед распылением HVOF и наносили в качестве верхнего покрытия. Для изготовления различных образцов в этом исследовании использовалось распылительное оборудование METCO ROBOT HVOF, состоящее из системы управления, распылительного пистолета, устройства подачи порошка, насоса для охлаждения водой и соединительных шлангов.

В процессе HVOF в качестве топлива использовался  $H_2$  при давлении сгорания 0,55 МПа, скорости газа 2000 м/с, скорости частиц 500 м/с, впрыске порошка с осевой подачей (более горячая зона), более высоком давлении впрыска порошка и скорости распыления до 120 г/мин. Используемый пистолет представляет собой струйный пистолет Metco HVOF, 2700 Diamond с водяным охлаждением. Газотопливная пушка HVOF показана выше на рисунке 13. Распыление HVOF проводилось на M/s Aum Surface Technology, Бангалор.

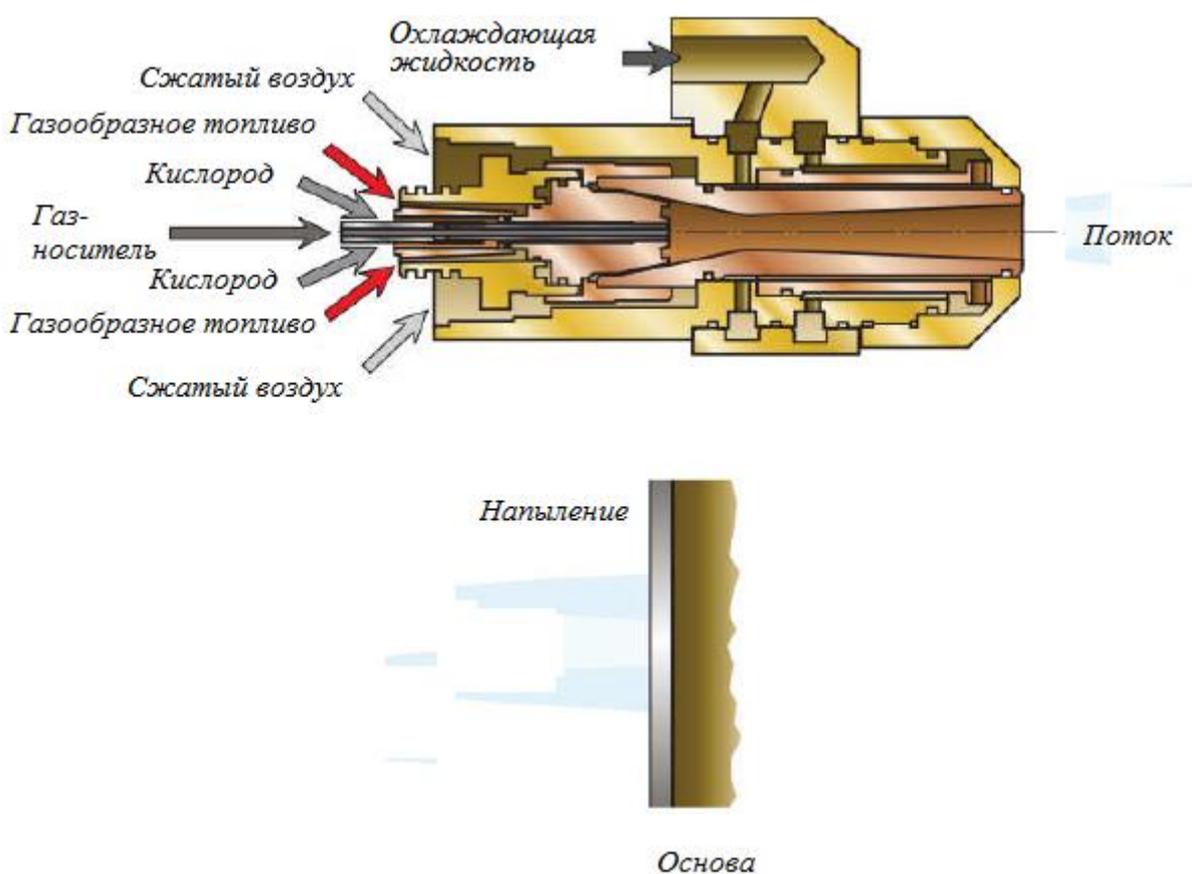


Рисунок 13 – Газотопливный процесс HVOF

Исследования характеристик, такие как XRD, SEM/EDS, толщина покрытия, шероховатость покрытия и исследования поляризации, были проведены, чтобы понять морфологию и физико-химическую природу поверхности с покрытием и рекомендовать пригодность для многих экстремальных условий его применения. Рентгеноструктурное исследование проводилось с использованием оборудования модели D8 ADAVANCE ECO,

Источник рентгеновского излучения – 1 кВт Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ), Геометрия – Брэгга-Брентано ( $\theta$ - $\theta$ ):, Диапазон углов ( $2\theta$ ): - От  $110^\circ$  до  $+168^\circ$ , держатель образца – обычный, столик для проб – вращающийся, детектор – детектор SSD 160. Исследования с помощью сканирующего электронного микроскопа/электродисперсионной спектроскопии проводились на Hitachi Make и Model S 3500, с детекторами – BSE и SE, разрешение – 30 нм, с максимальным увеличением до 300 000 К, покрытие – углерод и золото, аксессуары – стадия охлаждения. для наблюдения за вязкими или гелеобразными материалами. СЭМ-изображения использовались для изучения микроструктуры поверхности с покрытием, а ЭДС-исследования обеспечивали элементный анализ. Толщина покрытия играет важную роль в определении прочности сцепления покрытия с подложкой. Исследования доказали, что меньшая толщина покрытия даже до 3 мкм предотвращает расслоение покрытия и обеспечивает более высокий срок службы.

Большая толщина покрытия приводит к плохой прочности покрытия из-за остаточных напряжений и большого количества дефектов. Поэтому необходимо обязательно измерить толщину покрытия. Для исследования использовали прибор магнитной индукции. Для исследования использовался толщиномер покрытия модели CM 8829. Шероховатая поверхность основы необходима для усиления адгезии покрытия. Нагар с покрытием попадает во впадины и впадины на поверхности и сцепляется с основным металлом. Поэтому крайне важно измерить шероховатость поверхности после пескоструйной обработки. В таких исследованиях обычно используют стандартный профилометр контактного типа. Измеряются такие параметры шероховатости, как Ra и Rz. [20]

Коррозионные характеристики зависят от рассматриваемой системы металл/раствор. Тест состоит из поляризационной ячейки, состоящей из раствора электролита, электрода сравнения, противоэлектрода и интересующего металлического образца (рабочего электрода), соединенного с держателем образца. Электроды подключены к электронному прибору,

называемому потенциостату. Рабочий, контрольный и счетный электроды помещаются в раствор электролита, который соответствует реальной среде применения испытуемого материала. В растворе между различными электродами создается электрохимический потенциал (напряжение). Потенциостат измеряет потенциал коррозии ( $E_{\text{corr}}$ ), который представляет собой разность энергий между рабочим электродом и электродом сравнения.

В потенциодинамических экспериментах приложенный потенциал со временем увеличивается, а ток постоянно контролируется. Ток (или плотность тока) отображается в зависимости от потенциала. После того как потенциал сканируется до заданной плотности тока или потенциала, сканирование потенциала может быть обращено вспять, в то время как ток продолжает измеряться. Этот метод называется обратной поляризацией или циклической поляризацией. Экспериментальная установка для теста показана на рисунках 14 и 15.

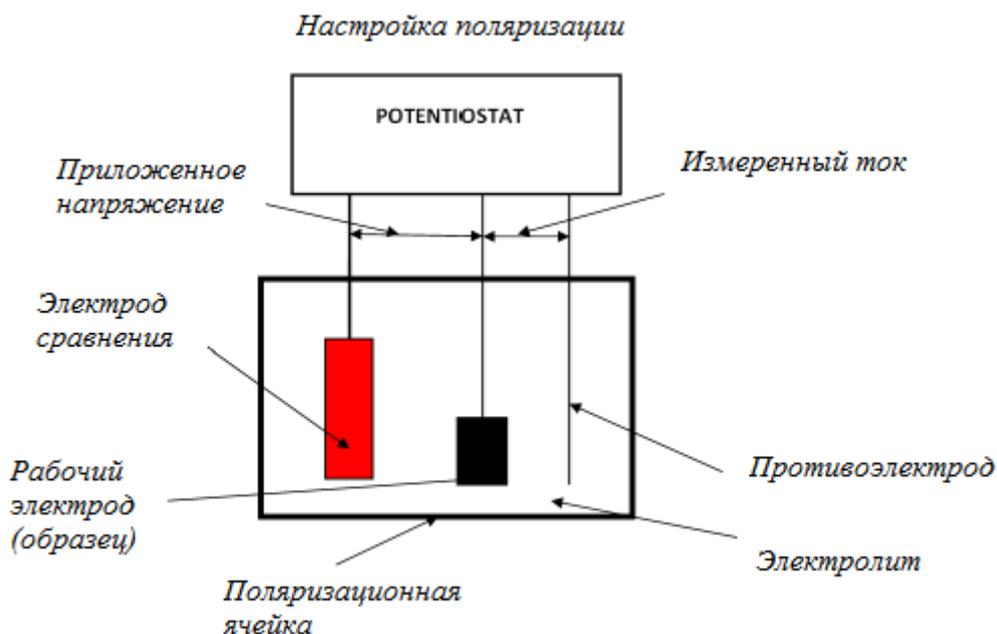


Рисунок 14 – Настройка поляризации

Исследуемый образец с покрытием устанавливали в установку и заполняли ячейку раствором электролита. Поверхность с покрытием была

обращена к отверстию, предусмотренному в установке для экспонирования, а поверхность без покрытия была обращена к зрителю. Для определения скорости коррозии давали выдержку продолжительностью в 24 часа.

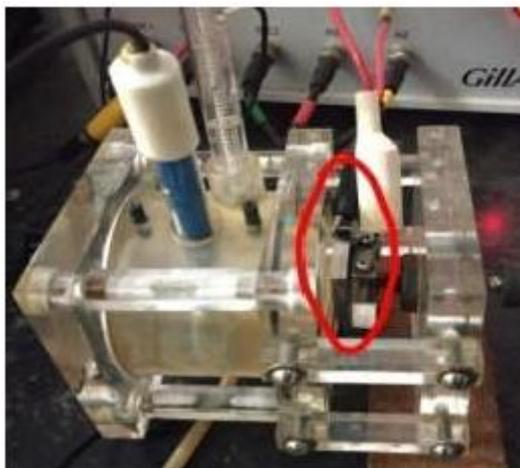
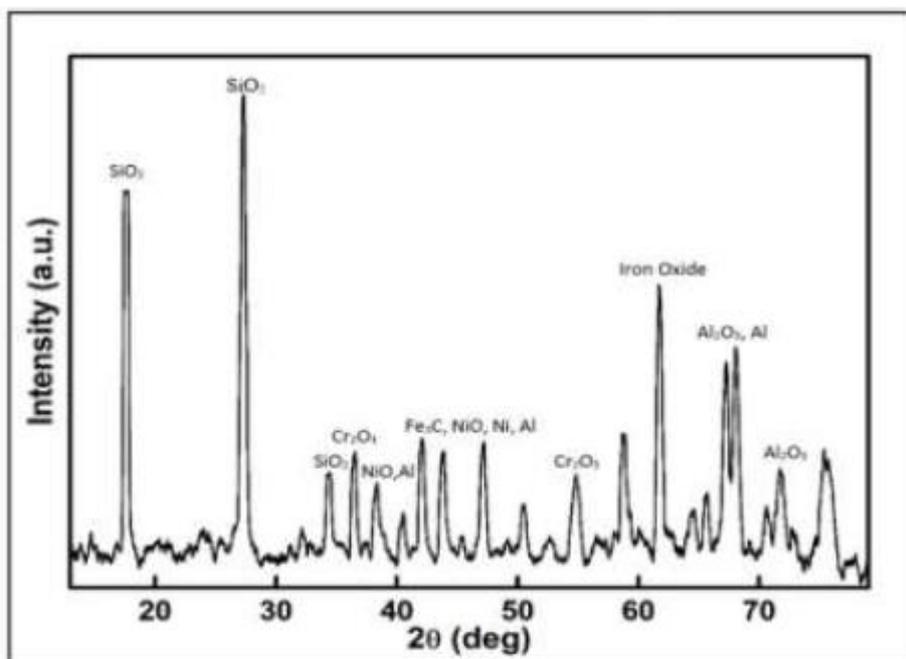


Рисунок 15 – Изображение установки

Поляризационные исследования проводились с использованием морской воды, собранной из Бенгальского залива, и синтетической воды, приготовленной в лаборатории. Синтетическая вода состоит из хлорида натрия (поваренной соли) – 30г, хлорида калия – 0,8г, сульфата магния – 6,6г, гидрокарбоната натрия – 0,5г, хлорида кальция – 1,3г. Обе пробы воды были кислыми с рН 8...8,5. Поскольку морская вода имела тот же состав, что и синтетическая вода, результаты представлены только для морской воды.

На рентгенограмме показаны керамические фазы оксида алюминия и диоксида кремния в структуре с покрытием. Четкие пики показывают, что структура имеет кристаллическую природу. Интенсивность фаз оксида алюминия и диоксида кремния высока из-за более высокого массового содержания вышеуказанных материалов. Также наблюдаются оксиды никеля и хрома низкой интенсивности, поскольку связующее покрытие содержит их. Из вышесказанного ясно, что термическое напыление создает оксидный слой над связующим слоем и под верхним слоем, который будет действовать как

дополнительный барьер для экстремальных условий окружающей среды. Рентгенограмма образца с покрытием представлена на рисунке 16.

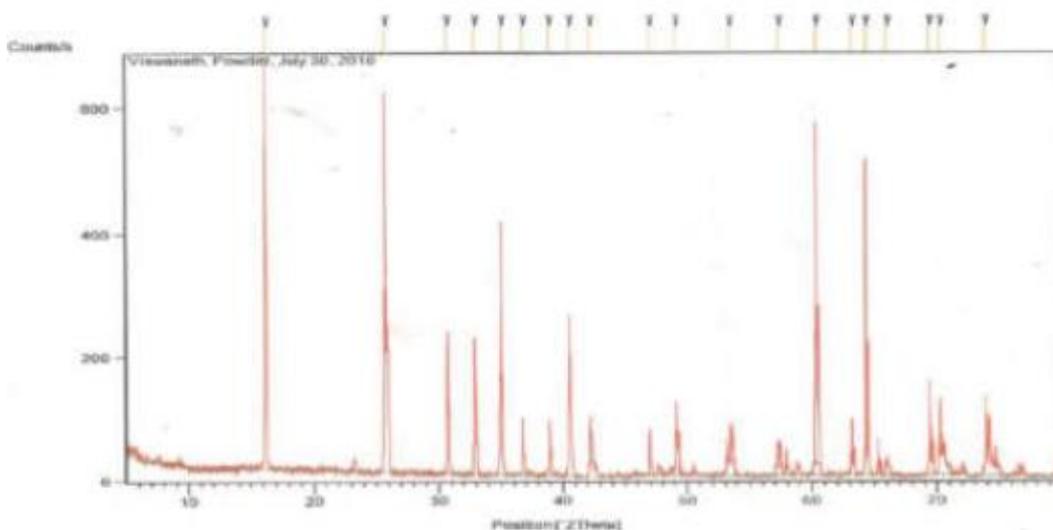


a)

itadent

Page 2

7/30/2010



b)

Рисунок 16 – Рентгенограмма образца с покрытием (а), порошка (б)

Изображения СЭМ при увеличении 100, 500, 1000, 2100, 5000 и 10 000 показаны ниже на рисунке 17. Изображения, полученные с помощью СЭМ, отображают морфологию пятен покрытия при различных увеличениях.

Структура типична для методов термического напыления, таких как плазменное напыление и HVOF. На изображениях видно перекрытие распыляемых частиц, поскольку затвердевание происходит постепенно. На изображениях также видны пустоты, пористость, трещины и нерасплавленные частицы. Из-за наличия этих дефектов покрытие становится менее плотным и подвержено коррозии.

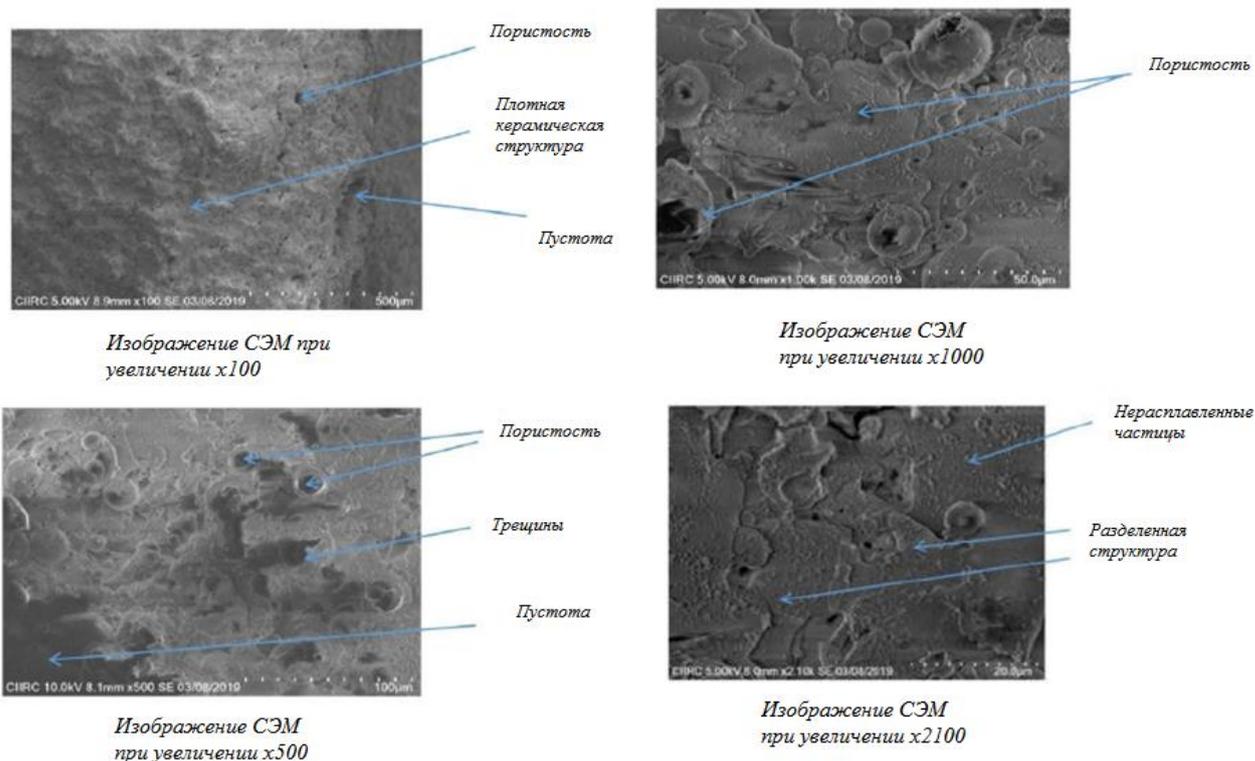


Рисунок 17 – Изображение, полученные с помощью СЭМ

Эти результаты отражаются на содержании кремния и кислорода, поскольку эти элементы присутствуют в керамическом верхнем слое. Наличие связующего материала может быть связано с более высокой пористостью и пустотами верхнего слоя в некоторых локальных зонах.

В таблице 5 приведены показания, полученные в 10 различных местах на поверхности покрытия для измерения толщины покрытия.

Таблица 5 – Измерение толщины покрытия

№ испытания	Толщина покрытия (мкм)	№ испытания	Толщина покрытия (мкм)
1	252	6	296
2	260	7	271
3	270	8	294
4	269	9	316
5	258	10	349
Средняя толщина покрытия: 283,5			

Средняя толщина покрытия, состоящего из связующего слоя и верхнего слоя на низкоуглеродистой стали, составляет 283,5 мкм. Для улучшения адгезии покрытия к подложке желательна меньшая толщина. Термическое напыление с использованием технологии HVOF обеспечивает толщину в вышеуказанном диапазоне, что приемлемо для многих применений. [20]

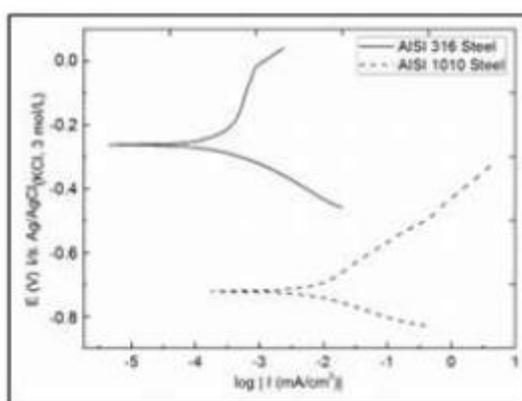
Результаты измерений шероховатости поверхности образцов, обработанных пескоструйной обработкой MS, и образцов с керамическим покрытием приведены в таблице 6. В таблице показана шероховатость поверхности образцов из низкоуглеродистой стали, которая необходима для обеспечения адгезии покрытия. В слое с керамическим покрытием шероховатость больше из-за образования трещин во время напыления. При необходимости можно выполнить полировку для улучшения качества поверхности.

Таблица 6 – Шероховатости поверхностей: Ra, Rq, Rz

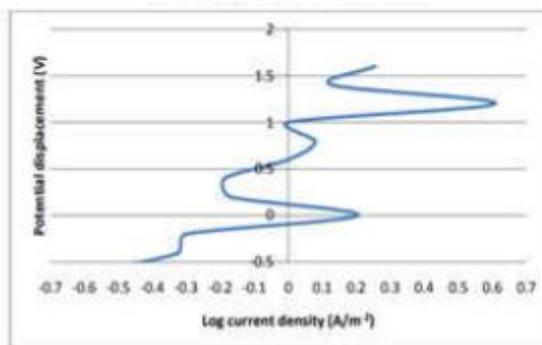
Материалы	Ra, мкм	Rq, мкм	Rz, мкм
Пескоструйная обработка MS	3,153	3,845	14,771
Керамическое покрытие MS	5,475	6,671	26,946

Графики Тафеля и результаты приведены ниже для основы из морской воды. Для образцов с покрытием было измерено значение  $I_{\text{corr}}$ , равное 0,1338116 мА/см<sup>2</sup> для основы из морской воды, и скорость коррозии, равная

1,55 мм/год. Для сравнения были изучены графики Тафеля и скорости коррозии нержавеющей стали и MS. Графики Тафеля для нержавеющей стали AISI 316 и, согласно литературным данным, углеродистая сталь AISI 1010 показала значение  $I_{\text{corr}}$ , равное  $-4 \text{ mA/cm}^2$  и  $-2 \text{ mA/cm}^2$  соответственно [22]. Электролит состоял из 3,0% раствора хлорид-ионов, и испытание проводили при температуре  $24^\circ\text{C} \pm 1,0^\circ\text{C}$ ; скорость сканирования  $0,5 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ . Это означает низкую скорость коррозии SS316 и углеродистой стали 1010. На рисунке 18 представлены графики Тафеля.



*График Тафеля для нержавеющей стали*



*График Тафеля для низкоуглеродистой стали*

Рисунок 18 – Графики Тафеля

Значения  $I_{\text{corr}}$  (в диапазоне от 8 до  $50 \text{ mA/cm}^2$ ) и скорости коррозии (в диапазоне от 0,904 до 5,921 мм/год) значительно выше в случае образцов MS без покрытия, испытанных в морской воде.

Очевидно, что скорость коррозии является удовлетворительной и достаточно хорошей для коммерческого применения. Полученный результат

аналогичен полученному для нержавеющей стали. Но для керамики более высокого качества желательна более низкая скорость коррозии. Причиной высокой скорости коррозии, как правило, является высокий процент пористости, трещин, пустот и окислительных сеток. Пористость напыляемых покрытий HVOF обычно составляет от 6 до 21 % по объему. Для снижения уровня пористости можно улучшить управление технологическим процессом и использовать вакуум или инертный защитный газ. Это позволяет получить более плотное покрытие и обеспечить повышенную скорость коррозии, поскольку плотность (непроницаемость) играет важную роль в коррозионной стойкости покрытий. [20]

Керамическое покрытие было нанесено на низкоуглеродистую сталь с использованием технологии HVOF. Были проведены такие исследования характеристик, как рентгенография, СЭМ, ЭДС, измерены толщина покрытия, шероховатость поверхности, адгезия покрытия и выполнен поляризационный тест на коррозию. Результаты рентгенографии показали наличие различных фаз в покрытии. Методы СЭМ и ЭДС позволяют идентифицировать и определить микроструктуру и состав поверхности с покрытием. При поляризационном испытании была получена скорость коррозии, равная 1,5562 мм/год. Материал с покрытием сравним с никелем. Это приемлемая скорость коррозии, и мы можем использовать ее для многих морских применений. Принимая во внимание приведенные выше результаты, на низкоуглеродистую сталь можно наносить керамические покрытия для применения в экстремальных условиях окружающей среды. В то же время, благодаря улучшенному управлению процессом и использованию инертного защитного газа или вакуума, покрытие может быть более плотным, что приводит к улучшению морфологии, лишенной таких дефектов, как высокая пористость, пустоты и нерасплавленные частицы. Это может увеличить срок службы покрытия для многих областей применения. [20]

Одним из способов увеличения износостойкости средств технологического оснащения является метод электроискрового нанесения

покрытий (ЭИМП). Организация этого метода в производственных условиях при упрочнении партий инструмента требует не только специализированного оборудования, но и оптимизации процесса. Это позволит сократить операционное время, затрачиваемое на нанесение нового покрытия и затраты, связанные с ним. [28]

Процесс нанесения покрытий электроискровым методом в реальных условиях регламентируется следующими параметрами [28]:

- мощностью генератора импульсов,  $W$ ;
- скоростью перемещения электрода,  $V$ ;
- толщиной наносимого покрытия,  $h$ .

Для получения покрытия с прочным соединением материала анода (электрода) с материалом катода (изделием) необходимо соблюдать условие, чтобы температура на поверхности катода была равна температуре плавления  $\Theta = T_{пл}$  [28]. Таким образом, это условие можно записать в виде:

$$T_{пл} = \frac{q_0}{2\pi\lambda} \cdot F(k). \quad (2)$$

В данном уравнении неизвестными величинами являются интенсивность источника  $q_0$  и скорость движения источника, являющаяся аргументом функции  $F(k)$ .

В [28] было определено, что нагрев катода осуществляется от двух источников, суммарная мощность которых определяется мощностью генератора импульсов.

$$q_2 + q_3 = q_0 = \eta \cdot \frac{W}{S_э}, \quad (3)$$

где  $\eta$  – КПД генератора импульсов,  $\eta = 0,8$ ;

$W$  – мощность разряда, определяемая типом генератора, применяемого в конкретном случае.

Уравнение (2) является техническим ограничением «снизу», то есть это функция равных температур, при которых должна обеспечиваться совокупность параметров: мощность генератора  $W$  и скорость движения источника  $v$ , которая в данном выражении учитывается функцией  $F(k)$ . [28]

Скорость движения источника определяет производительность процесса нанесения покрытий  $v$ , при расчете оптимального режима, должна быть выбрана максимально большой. Это выражение ( $V \rightarrow \max$ ) будет являться целевой функцией системы оптимизации. [28]

Уравнение (2) с учетом (3) может быть представлено так:

$$W = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot S_{\text{э}} \cdot T_{\text{пл}}}{\eta \cdot F(k)}. \quad (4)$$

Для определения третьего параметра процесса – толщины наносимого покрытия будем считать, что в установившемся процессе электроискрового легирования вся энергия, поступающая в анод (электрод), расходуется на его частичное расплавление и переносится на катод. Такое допущение справедливо, так как в установившемся процессе электрод (анод) отдает теплоту катоду через переносимый материал, а также в окружающую среду. Теплообмен с окружающей средой осуществляется через воздух, который является плохим проводником тепла. По мнению авторов [28] для большинства материалов в обычных условиях при наиболее приятных режимах с точки зрения качественных показателей и производительности процесса величины привеса имеют максимум, то есть толщина формируемого слоя на катоде ограничена. Ограниченность толщины формируемых слоев на катоде (детали) во многих случаях сдерживает практическое использование ЭИМП. Поэтому анализ факторов, определяющих такой характер процесса, и поиск возможностей целенаправленного управления ими являются весьма актуальными. [28]

Фазовые и структурные превращения, нагрев и охлаждение поверхностных слоев материала электродов под воздействием электрических импульсов приводят к возникновению в них остаточных напряжений I и II рода, характеризующих их конечное необратимое напряженное состояние. В итоге в реальных условиях нанесения покрытий весь комплекс процессов, протекающих между анодом и катодом определяется законом сохранения энергии. С учетом вышесказанного с небольшой погрешностью, связанной с испарением материалов в окружающую среду (на что по оценке различных авторов приходится 3...5%) можно предположить, что интенсивность теплового потока перенесенной энергии равна:

$$q_3 = \eta \cdot p \cdot \frac{W}{S_3} = m_3 \cdot L_{f3}. \quad (5)$$

Это выражение определяет скорость расплавления (нанесения) материала электрода. Масса переносимого в единицу времени электрода определяется произведением плотности на объем. [28]

$$m_3 = \rho_3 \cdot d \cdot h \cdot v. \quad (6)$$

Следовательно, выражение (5) можно представить в следующем виде:

$$\eta \cdot p \cdot \frac{4W}{\pi \cdot d^2} = \rho \cdot h \cdot d \cdot v \cdot L_{f3}, \quad (7)$$

$$W = \frac{\pi \cdot \rho \cdot L_{f3} \cdot d^3}{4 \cdot \eta \cdot p} \cdot h \cdot v. \quad (8)$$

Это выражение связывает мощность генератора импульсов в конкретных условиях процесса с толщиной покрытия и скоростью движения анода. [28]

Толщина покрытия выбирается из опыта, для различных наносимых материалов и условий эксплуатации она может быть разной, но следует учитывать одно обстоятельство: чем больше толщина покрытия, тем оно более хрупкое. Поэтому чаще всего толщина покрытия режущего инструмента берется в пределах 8...12 мкм. Испытаниями инструмента в производственных условиях подтверждена справедливость этого утверждения. Покрытия толщиной 20 мкм и более, как правило, изнашиваются скалыванием. [28]

Из сказанного следует, что процесс электроискрового легирования описывается следующей системой уравнений:

$$W = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot S_{\text{Э}} \cdot T_{\text{ПЛ}}}{\eta \cdot F(k)} \quad (9)$$

$$W = \frac{\pi \cdot \rho \cdot L_{\text{фЭ}} \cdot d^3}{4 \cdot \eta \cdot p} \cdot h \cdot \nu \quad (10)$$

$$W \leq W_{\text{max}} \quad (11)$$

$$W \geq W_{\text{min}} \quad (12)$$

В [28] рассмотрен пример нанесения покрытия из безвольфрамового твердого сплава ( $\rho = 5,37$  г/см<sup>3</sup>,  $\lambda = 0,21$  Вт/(см·0С),  $L_{\text{фЭ}} = 1,45 \cdot 10^7$  Вт/(г·с)) на быстрорежущую сталь ( $T_{\text{ПЛ}} = 1550$  0С) при следующих условиях:  $a = 1$ ,  $d = 2$  мм.

Решение уравнений (9-12) представлено графиком на рисунке 19.

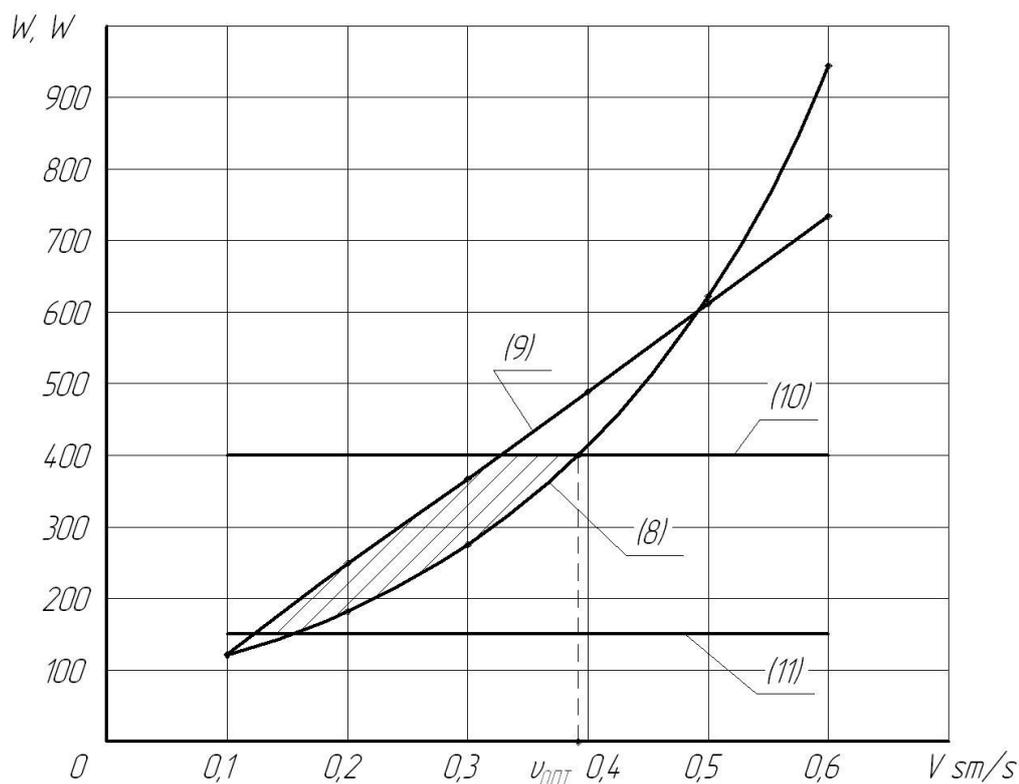


Рисунок 19 – Оптимизация процесса электроискрового легирования быстрорежущей стали электродом из безвольфрамового твердого сплава

На рисунке 19 график функции по уравнению (9) показывает значения мощности генератора  $W = F(v)$ , при которой на поверхности упрочняемого изделия температура равна температуре плавления, то есть эта функция представляет собой нижнее ограничение в системе оптимизации.

График функции по уравнению (10) показывает максимальные значения мощности  $W = F(v)$ , при которой обеспечивается принятая толщина покрытия, то есть эта функция представляет собой ограничение сверху в системе оптимизации.

Функции, представленные уравнениями (11) и (12), являются так же ограничениями сверху и снизу.

На рисунке 8 графиками функций (9-12) выделена область возможных искомых решений, оптимальное решение соответствует точке очерченной области с  $v_{max}$ . Эта точка лежит на кривой равных температур с значением  $v_{opt} \approx 0,39$  см/с.

Следовательно, для данных условий нанесения покрытия технологический процесс должен проводиться на оптимальном режиме при следующих параметрах:  $v \approx 0,39$  см/с;  $W = 400$  Вт и  $h = 12$  мкм. [28]

На рисунке 20 представлена фотография микрошлифа образца, прошедшего упрочнение на оптимальных режимах. Покрытие наносилось на установке модели Элитрон-22А. Из рисунка видно, что покрытие имеет довольно равномерную структуру, разрывов покрытия нет.

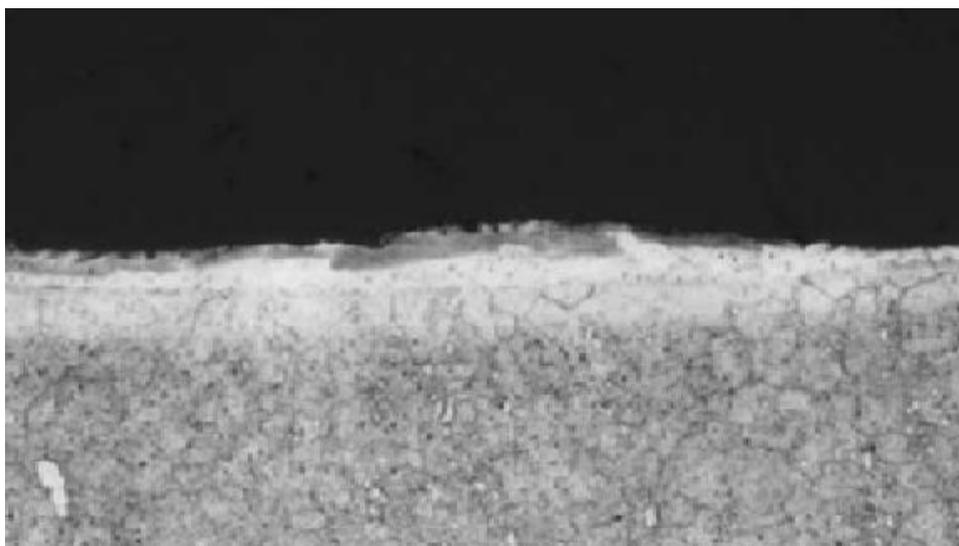


Рисунок 20 – Фотография микрошлифа образца из быстрорежущей стали с покрытием (увеличение  $\times 1000$ )

Таким образом, в работе [28] представлена система уравнений для оптимизации процесса, где целевой функцией является производительность. Ограничением «снизу» является линия равных температур, а ограничением «сверху» является требуемая толщина покрытия. Дополнительными ограничениями служат возможности оборудования.

Система оптимизация прошла экспериментальную апробацию, которая показала однородность и надежность формируемого слоя. [28]

Внедрение электроискрового нанесения покрытий на режущий инструмент увеличивает его износостойкость, вкладывается в концепцию бережливого производства и ведет к уменьшению расхода инструмента.

Износ детали может иметь различный характер. Различают механический износ, коррозионно-механический, а также эрозионный износ детали. В работе [11] восстановлению подвергали кольца грунтового насоса, представленные на рисунке 21.

Многие предприятия после операций восстановления деталей машин для придания должных свойств восстановленным поверхностям выполняют химико-термическую обработку. [11]

Способ восстановления [11] заключается в том, что на деталь наносятся три различных слоя, которыми являются металл, неметалл и связующее звено. Этот способ включает в себя, кроме этого, нанесение адгезива на изношенную поверхность, который увеличивает сцепляемость многослойного покрытия с материалом основы.

Для рационального выбора адгезива и полимера проводились лабораторные испытания, на которых в качестве полимера был принят полиуретан СКУ ПФЛ-100 [11], а в качестве адгезива – силбонд 49СФС. Также была разработана технология нанесения износостойкого, в которой был определен порядок проводимых восстановительных операций и их подробности. Технологический процесс нанесения покрытия включал а себя: механическую обработку кольца; выполнение проточек на все обработанные поверхности; обезжиривание обработанных поверхностей; обработку поверхностей адгезивом, которые связывает покрытие и основу; обхват вышеупомянутых поверхностей внутренней и внешней литейными формами; заливку полиуретана между литейными формами и деталью; выдержку всей полученной системы под температурой около 100 °С в течение трех часов; извлечение полученных образцов.



Рисунок 21 – Кольца грунтового насоса

Результатами производственных испытаний было выявлено, что износостойкость колец с покрытием примерно в 15 раз оказалась выше колец без покрытия, что существенно увеличивает срок службы и детали в частности и насоса в целом.

Еще одним примером применения данной технологии являлось нанесение износостойкого покрытия на уплотнительное кольцо грунтового насоса землесосного снаряда. [11] На рисунке 22 представлено данное кольцо после намыва 150 000 т песка, а на рисунке 23 – восстановленное кольцо грунтового насоса.



Рисунок 22 – Внешний вид изношенного кольца грунтового насоса

На рисунке 23 показано кольцо, которое отработало намыв более 1 млн т песка и повторно восстановлено.

Следовательно, нанесение износостойкость покрытия, согласно изобретения [16] позволяет существенно повысить износостойкость деталей машин, а также позволяет восстанавливать свойства изношенных поверхностей деталей, во многих случаях придавая восстановленным поверхностям улучшенные свойства.



Рисунок 23 – Внешний вид восстановленного кольца грунтового насоса

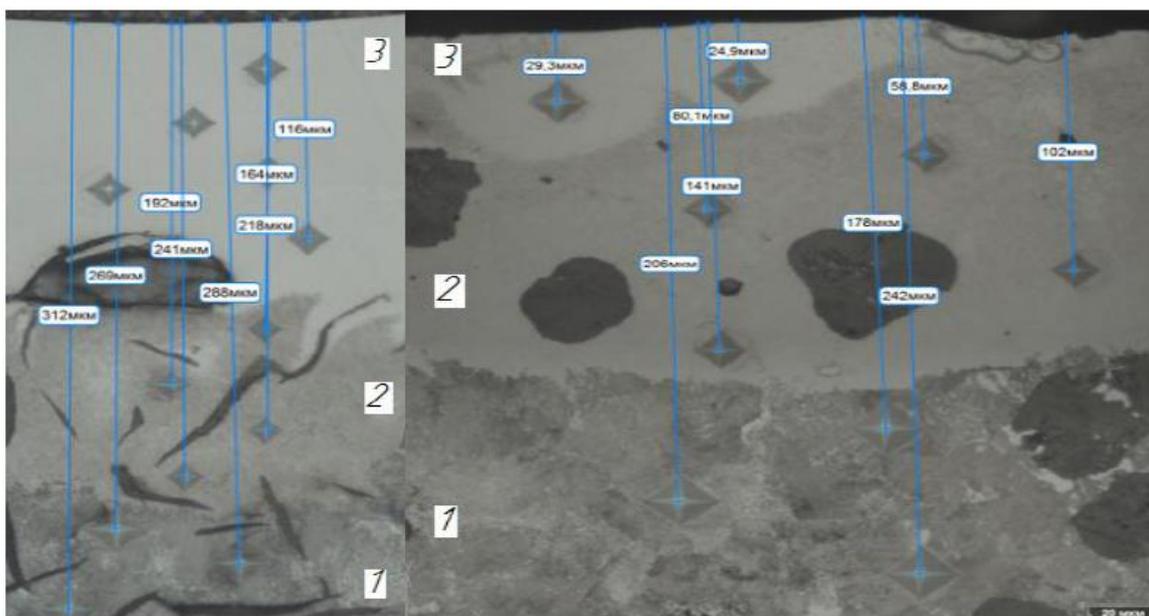
В данном разделе проанализированы способы создания износостойких покрытий и их химический состав. Выполнен анализ применимости того или иного способа нанесения износостойких покрытий на поверхности станочных приспособлений.

#### 4 Термическая обработка поверхности основного материала

Эффективным способом увеличения износостойкости поверхностей является воздействие на них высокотемпературным лазерным лучом [6]. В этом случае обрабатываемая поверхность нагревается до высоких температур и происходит термическая обработка, то есть преобразование структуры материала основы. В частности, в сталях и чугунах преобразованию подвергается углерод из одного состояния в другое. Эти преобразования приводят к изменению физико-механических свойств поверхностного слоя деталей и к изменению их износостойкости при дальнейшем использовании в составах машин.

Исследованиями [12] лазерному упрочнению подвергались образцы из серого чугуна СЧ21 и высокопрочного чугуна ВЧ-50-75. В частности выполнялась лазерная закалка образцов оптоволоконным тербиевым квазинепрерывным лазером ЛКД4-015.150 со скоростью обработки 10 мм/с и плотностью мощности  $4,5 \times 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>. При обработке поверхности образцов частично оплавливались. После проведения закалки изготавливались микрошлифы образцов и замерялась микротвердость поверхностей в глубину на микротвердомере Shimadzu HNV-2 при нагрузке индентора 20 гс. На рисунке 21 представлены поперечные сечения обработанных образцов.

Из рисунка 24 [12] видно, что у серого чугуна СЧ21 зона термического влияния проникает на глубину до 250 мкм, а у образцов из высокопрочного чугуна ВЧ-50-75 – 150...160 мкм при одной и той же интенсивности лазерной закалки. Твердость поверхности образца из серого чугуна СЧ21, закаленного лазерным способом повысилась примерно в 3 раза, а у образца из высокопрочного чугуна ВЧ-50-75 твердость закаленной поверхности повысилась примерно в 2 раза. Это говорит о целесообразности проведения такого рода обработки для чугунных деталей станочных приспособлений.



а)

б)

1 – материал основы; 2 – зона термического влияния; 3 – зона оплавления

Рисунок 24 – Поперечные сечения образцов из серого чугуна СЧ21 (а), высокопрочного чугуна ВЧ-50-75 (б)

Важным звеном в жизненном цикле любого машиностроительного изделия является способность к восстановлению и ремонтпригодность. Нанесением покрытия можно восстанавливать изношенные поверхности деталей машин. Причем свойства восстановленных поверхностей может быть даже лучше, чем у поверхности новой детали. [11] Восстановление поверхностей деталей машиностроительных систем чаще всего требует меньших затрат, чем на производство новой детали.

Авторами [27] в своем исследовании способности прецизионной твердой токарной обработки увеличивать усталостную долговечность при контакте качения сообщили, что прецизионная твердая токарная обработка обеспечивает однородную толщину тонкого белого слоя и переходной зоны. Испытания на наноиндентирование показали, что белый слой примерно на 50% тверже, чем твердость сыпучего материала, а переходная зона примерно на 30% мягче, чем сыпучий материал. Срок службы деталей из подшипниковой стали, обработанных методом прецизионной жесткой

токарной обработки, достиг 5,2 (при шероховатости Ra 0,12 мкм) и 0,32 миллиона циклов (при шероховатости Ra 0,25 мкм). Следовательно, срок службы такого инструмента увеличивается по мере уменьшения амплитуды шероховатости.

По сравнению с прецизионным твердым точением (срок службы RCF достигает 5,2 миллиона циклов при Ra 0,12 мкм), срок службы деталей подшипников, обработанных методом шлифования, достиг 1,2 миллиона циклов (при Ra 0,2 мкм), тогда как при шлифовании с последующим хонингованием он достиг 3,2 миллиона циклов (при Ra 0,1 мкм).

Авторами [36] в своем исследовании по твердосплавной обработке стали AISI 4340 с использованием твердосплавного инструмента с многослойным покрытием сообщили, что скорость подачи оказывает наибольшее физическое, а также статистическое влияние на усилие обработки (53,38%), за которым следуют глубина резания (36,04%) и скорость резания (6,75%). Усилие обработки первоначально увеличивается с увеличением скорости подачи и глубины резания и уменьшается с увеличением скорости резания. Уменьшение усилий, вероятно, связано с повышением температуры в области плоскости сдвига, что привело к снижению прочности материала на сдвиг. Скорость подачи оказывает наибольшее влияние на удельное усилие резания при выполнении операции механической обработки (70,55%), за которым следуют глубина резания (14,05%) и скорость резания (13,42%). При более низкой скорости подачи срез материала неадекватно соответствует процессу образования стружки. Поскольку материал подвергается более низким скоростям деформации, это приводит к увеличению удельного усилия резания.

«Важное место в современном машиностроительном производстве занимают процессы модификации поверхности материалов. Использование в промышленности большинства методов восстановления и упрочнения поверхностей неэффективно по причине высокой стоимости, трудоемкости и опасности возникновения неблагоприятного напряженного состояния в

поверхностном слое. В связи с этим весьма перспективным является использование методов поверхностной обработки высококонцентрированными источниками нагрева (ВКИН). Проводя физико-химические превращения в приповерхностном слое с использованием высокоинтенсивных источников нагрева (плазменных, лазерных, электронно-лучевых и других), за малые времена и с высокой производительностью возможно получать слои на различных изделиях и конструкциях со специальными свойствами при сохранении исходных свойств в массе материала. Среди методов упрочнения металлов выделяют шесть основных классов, причем методами класса осуществляются процессы различных типов. Отметим следующие классы:

- модификация поверхностного слоя металла изменение химического состава (метод диффузионного насыщения);

- упрочнение изменением структуры поверхностного слоя (лазерная и плазменная закалка по методу физико-термической обработки; электроимпульсная, электроконтактная и ультразвуковая обработка по методу электрофизической обработки; термомеханическая обработка; наплавка газовым пламенем, электрической дугой, лазерным лучом, пучком ионов);

- упрочнение изменением энергетического запаса поверхностного слоя (электроферромагнитная обработка, обработка в импульсном магнитном поле);

- упрочнение изменением всего объема металла (закалка светлая, несквозная, изотермическая, с самоотпуском, с подстуживанием, с непрерывным охлаждением и ступенчатая, отпуск высокий и низкий по методу термообработки при положительных температурах)». [3]

«Методы поверхностной модификации концентрированными потоками энергии (КПЭ) обладают следующими преимуществами:

- уменьшение хрупкости деталей и изделий в результате образования пластической и вязкой сердцевины, а также в случаях местного

расположения закаленного слоя только на участках, твердость которых должна быть высокой;

- существенное уменьшение деформаций во время нагрева и охлаждения, достигаемое за счет жесткости холодной сердцевины;
- практически полное устранение окисления и обезуглероживания, что позволяет в отдельных случаях производить закалку без шлифования;
- уменьшение затрат на нагрев, так как нагреваемый слой составляет небольшую часть от массы детали». [3]

«Среди методов упрочнения наиболее распространенной оказалась закалка. Отнесем сюда и объемную закалку с нагревом в печах, и поверхностную с нагревом концентрированными источниками, такими как лазер, плазма, токи высокой частоты (ТВЧ) и другие. Из методов ВКИН наиболее экономичным и производительным является плазменная обработка. Плазменно-дуговая поверхностная обработка обладает преимуществами, свойственными поверхностным методам термообработки (ТО) КПЭ, сочетая при этом в себе высокую производительность и возможность локальной ТО, получения специфических режимов ТО, управляемость и автоматизацию процесса, высокую концентрацию энергии в пятне тепловложения (таблица 7) и наличие относительно простых методов магнитоуправления дугой при использовании сканирующих методов ТО поверхности и так далее». [3]

«Процесс плазменного поверхностного упрочнения достаточно хорошо изучен и эффективно используется при поверхностной модификации для упрочнения деталей и инструмента (от небольших по размеру сверл и резцов до крупногабаритных валков прокатных станков) цилиндрической и плоской формы, для придания поверхности антикоррозионных, гидроизоляционных, защитно-декоративных свойств, металлизации и так далее». [3]

«Расширение номенклатуры изделий, эксплуатационные свойства которых возможно повысить при помощи плазменной модификации, ограничено формой и размерами этих деталей, а также особенностями применяемых плазмотронов. Это связано с необходимостью обеспечения

малой дистанции обработки – расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности должно выдерживаться в пределах  $(5 \pm 1)$  мм». [3]

Таблица 7 – Параметры процессов ТО концентрированными источниками энергии

Источник нагрева	Эффективный КПД нагрева	Плотность мощности,		Мощность, Вт	
		Вт/см <sup>2</sup>			
		min	max	min	max
Лазерный луч	0,85	$10^2$	$10^{10}$	10	$2,5 \times 10^4$
Электронный луч	0,85	$5 \times 10^2$	$10^7$	10	$10^5$
Ионный луч	0,85	$10^2$	$10^5$	10	$10^3$
Плазменная струя	0,80	$5 \times 10^2$	$10^5$	$10^3$	$10^5$
Электрическая дуга	0,75	$5 \times 10^2$	$4 \times 10^4$	50	$2 \times 10^5$
Газовое пламя	0,55	$2 \times 10^2$	$6 \times 10^2$	$10^2$	$10^4$

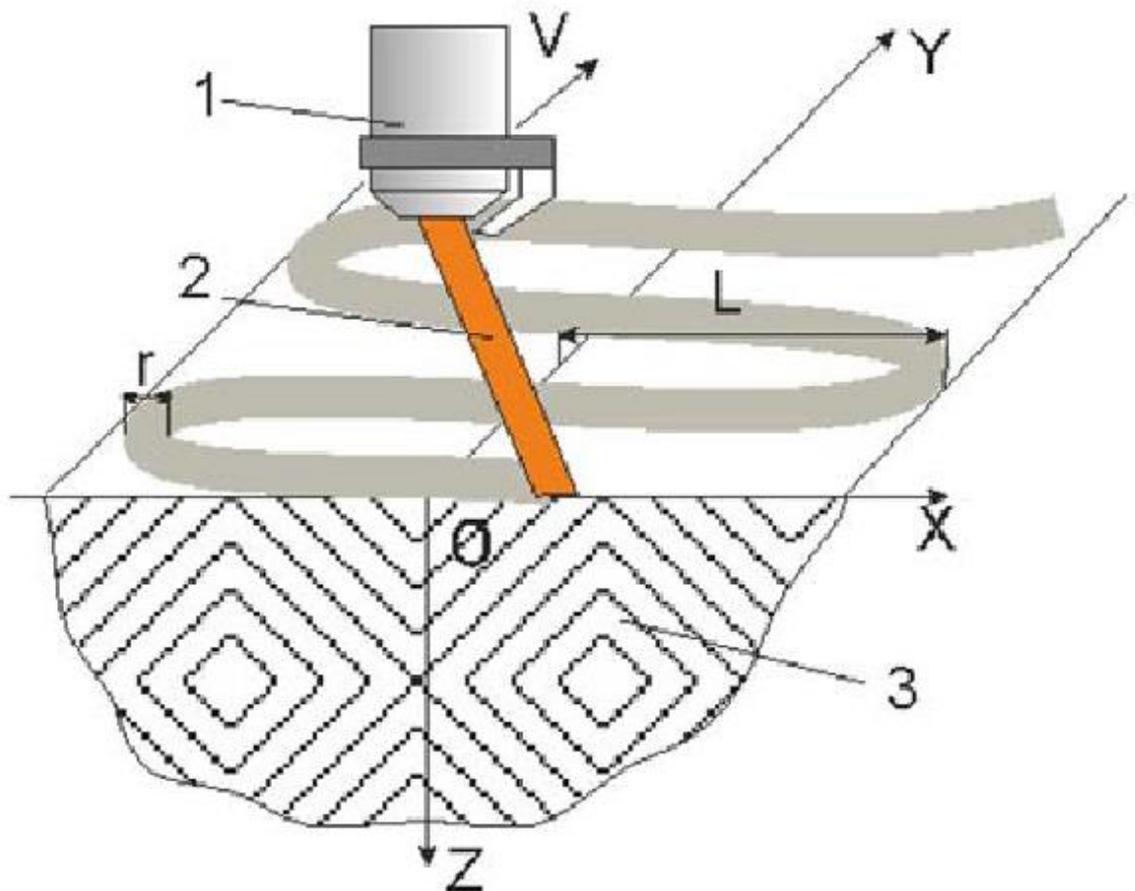
«Габариты плазмотронов высокой мощности в сочетании с плоской торцевой поверхностью сопловой части делают практически невозможным выполнение указанных условий при упрочнении сложных поверхностей. Кроме того, известные конструкции плазменных генераторов не всегда позволяют эффективно проводить процессы модификации поверхностей материалов вследствие низких и неравномерных по ширине обработки тепловых потоков, узкой ширины зоны обработки и другие. Для ряда конструкций, например, при использовании дуги прямого действия невозможно обрабатывать как диэлектрические, так и металлические материалы». [3]

«Таким образом, возможность обработки деталей сложной формы, а также достижения заданных свойств, а также достижения заданных свойств поверхностного слоя связаны с необходимостью выбора оптимальных конструкционных и технологических параметров плазмотрона или применения ручных способов пламенной заправки». [3]

Для более равномерного распределения свойств полученного слоя перемещение анодного пятна по поверхности выполняют как поступательно, так и в перпендикулярном направлении за счет влияния на дугу переменным магнитным полем. Также обрабатывают с небольшим перекрытием термообработанных слоев, причем оптимальный коэффициент перекрытия составляет  $\sim 0,5$ . Это обеспечивает формирование зон термической обработки с одинаковыми глубинами при однопроходной обработке.

«При обработке больших площадей поверхностей, а также использования сканирования возникает эффект многократного наложения отдельных рядов обработки, что приводит к появлению поверхностных зон с пониженной микротвердостью из-за наложения тепловых пятен с переменной интенсивностью и эффекта отпуска ранее закаленного участка. Данного эффекта можно избежать путем оптимизации временных параметров теплового воздействия по сравнению со скоростью структурных превращений. Положительный эффект термоциклирования поверхности сказывается также на повышении трещиностойкости поверхности вследствие выравнивания остаточных поверхностных напряжений. Наиболее интересны эффекты, достигаемые при термоциклировании в процессе термообработки поверхности сканирующим тепловым источником». [3]

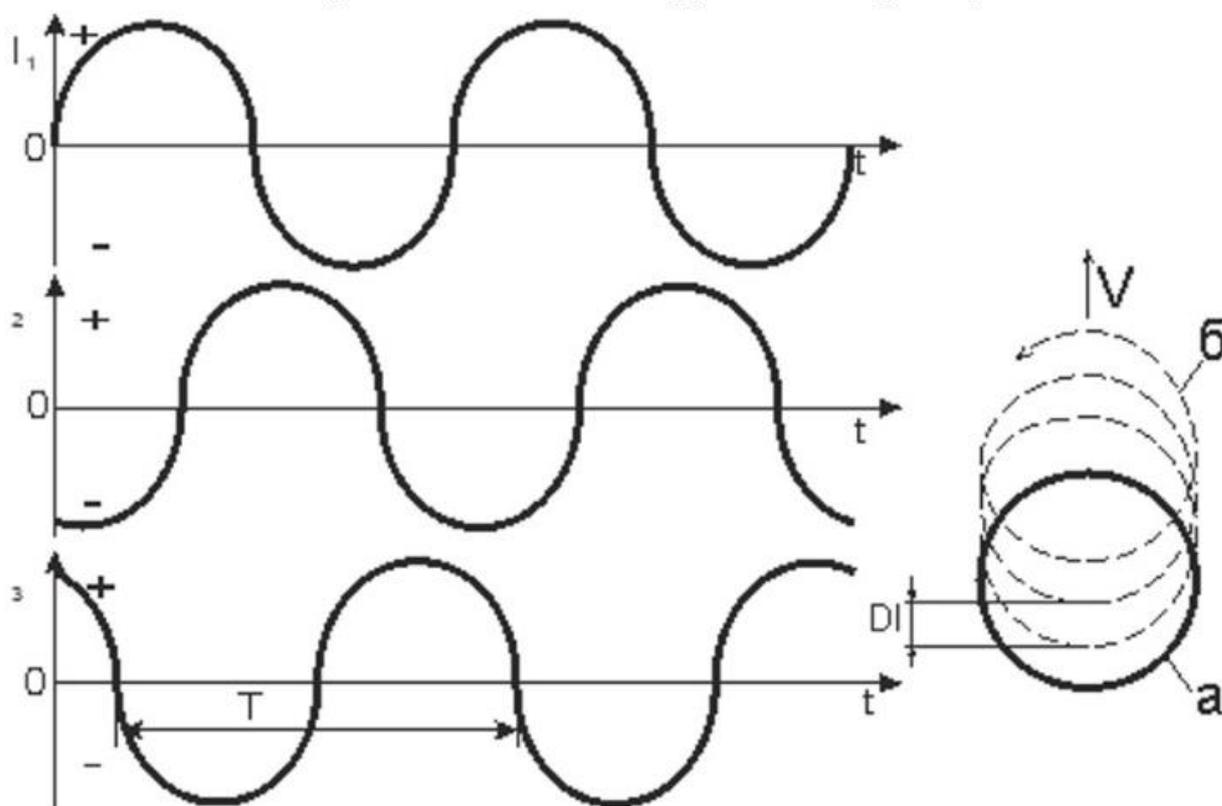
«В качестве иллюстрации рассмотренного метода можно привести описание представленного на рисунке 24 процесса сканирующей термообработки синусоидально движущимся по поверхности обрабатываемого материала плазменно-дуговым источником тепла, управляемым за счет воздействия переменного магнитного поля на ионизированный поток в плазменной дуге (струе)». [3]



1 – патрон со сканирующим устройством (дефлокатором); 2 – плазменная дуга; 3 – зона термического воздействия (ЗТВ);  $r$  – радиус пятна нагрева;  $L$  – амплитуда сканирования;  $V$  – скорость линейного перемещения по оси  $OY$

Рисунок 24 – Схема сканирующей синусоидальной обработки:

«Магнитное поле индуцируется в магнитных катушках (соленоидах), взаимное расположение которых, а также фазировка питающего их переменного электрического тока позволяют создавать различные схемы движения теплового источника. Характер изменения амплитуды магнитного поля определяется временной зависимостью амплитуды переменного тока. Несмотря на инерционность процессов, приводящих к небольшому искажению классических форм, в целом движение теплового источника можно описать синусоидальной зависимостью (рисунок 25)». [3]



$a$  – в неподвижной системе;  $b$  – в подвижной системе;  $T$  – период времени;  
 $DI$  – смещение за один период

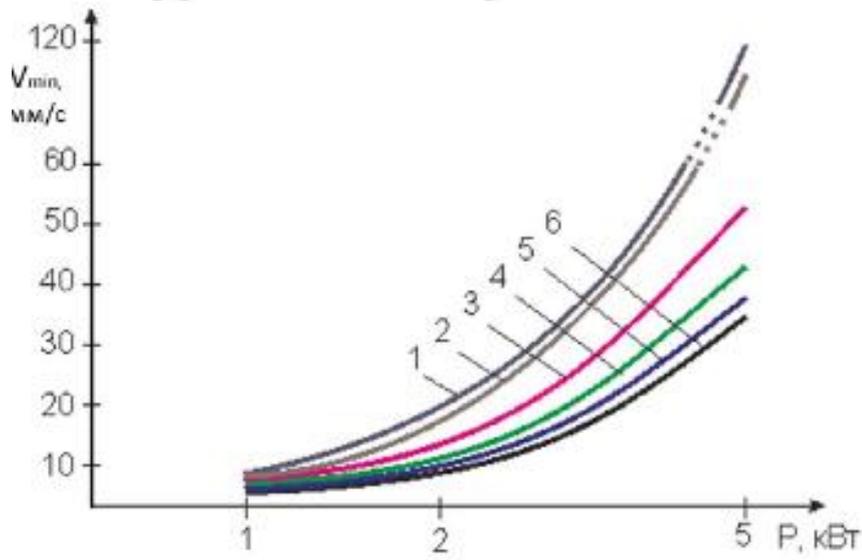
Рисунок 25 – Схема питания трехфазного устройства переменным током синусоидальной формы и характер перемещения теплового пятна по поверхности

«Анализ процессов плазменного воздействия на материал показывает, что поверхность обрабатываемого материала находится в зоне воздействия начального участка плазменной струи, характеризуемого неизменными температурой и скоростью потока по оси (равными значениями на срезе сопла), высокой турбулизацией и резким расширением струи, зависящим от формы сопла и характеризуемым углом полурасширения  $\alpha$ . Для оценки теплофизических процессов в поверхностном слое материала помимо свойств самого материала необходимо учитывать величину температуры в пятне тепловложения (площадь пятна изменяется при сканировании), плотность распределения энергии в зоне нагрева, эффективную тепловую

мощность, коэффициент полезного действия, геометрию струи (дуги), скорость перемещения пятна по траектории сканирования. В результате расчет характерных процессов становится сложной дифференциальной задачей с переменными параметрами и граничными условиями. Ряд таких задач применительно к описываемой технологии был решен авторами, что позволило оценить эффективность ее применения». [3]

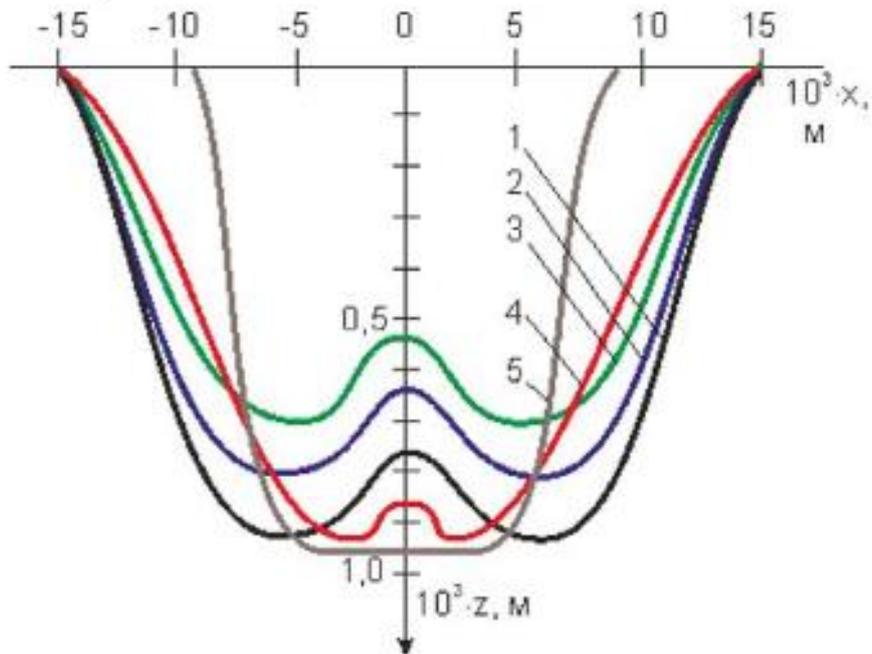
«На рисунке 26 представлены зависимость минимально допустимой скорости линейного передвижения  $V_{\min}$  теплового источника, рассчитанные в наиболее прогреваемой зоне, от частоты сканирования  $f$  и мощности источника  $P$ . Рост частоты ведет к снижению минимально допустимой скорости  $V_{\min}$ , при этом влияние частотного фактора снижается при частота в несколько сотен герц. Увеличение мощности теплового источника закономерно ведет к росту поверхностной температуры и, как следствие, к снижению скорости  $V_{\min}$ . По сравнению с предельно допустимыми скоростями перемещения источника без сканирования  $V_{\min}$  для процессов со сканированием снижается в 5-10 раз, что позволяет вести процесс термообработки в более широком диапазоне технологических режимов». [3]

«Особенностью синусоидальной сканирующей обработки является неравномерность нагрева по ширине зоны термообработки, что ведет к неравномерности глубины закалки  $z$  (рисунок 27) и свойств материала. Характер неравномерности зависит от типа теплового источника: при нагреве плазменными струями имеет место более равномерный нагрев на оси зоны и более быстрый спад температуры при удалении от оси, что приводит к меньшей ширине зоны закалки  $L$  по сравнению с плазменно-дуговым термоупрочнением». [3]



1 – 2 Гц; 2 – 5 Гц; 3 – 10 Гц; 4 – 50 Гц; 5 – 100 Гц; 6 – 500 Гц

Рисунок 26 – Зависимость минимально допустимой скорости линейного перемещения  $V_{min}$  от эффективной мощности  $P$  теплового источника ( $r = 5$  мм) и частоты сканирования  $f$



1 –  $L = 15$  мм,  $V_{min} = 40$  мм/с,  $f = 5$  Гц; 2 –  $L = 15$  мм,  $V_{min} = 40$  мм/с,  $f = 50$  Гц; 3 –  $L = 15$  мм,  $V_{min} = 40$  мм/с,  $f = 200$  Гц; 4 –  $L = 15$  мм,  $V_{min} = 8$  мм/с,  $f = 5$  Гц; 5 –  $L = 7$  мм,  $V_{min} = 40$  мм/с,  $f = 50$  Гц;

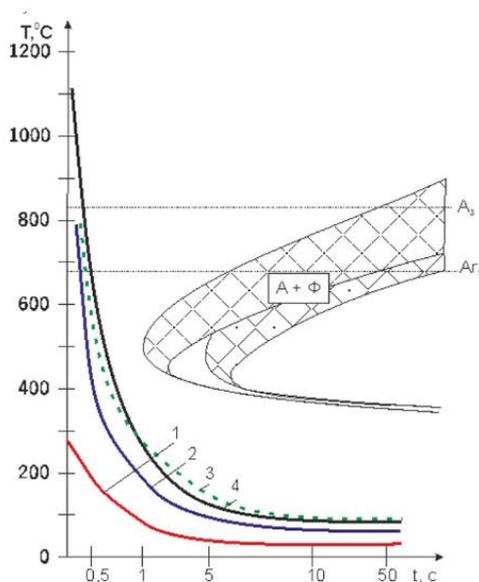
Рисунок 27 – Профиль термоупрочненной зоны ( $r = 5$  мм) при поверхностной плотности энергии  $q = 6 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>

«Также снижается средняя скорость нагрева в наиболее прогреваемой полосе, что закономерно дает большие значения глубины закалки и снижение минимально допустимых скоростей линейного перемещения  $V_{\min}$ . При малых амплитудах сканирования, эффект вызванный неравномерностью потока, незначителен». [3]

«Расчеты режимов охлаждения показывают (рисунок 28), что во всем диапазоне исследуемых частот (2...1000 Гц) и глубин закалки соблюдается режим быстрого охлаждения со скоростью, необходимой для получения структуры мелкозернистого мартенсита, что обеспечивает твердость закаленной структуры на уровне 300...330 НВ. Производительность процесса  $\Pi = 2 \times L \times V_{\min}$  аппроксимируется формулой (рисунок 29):

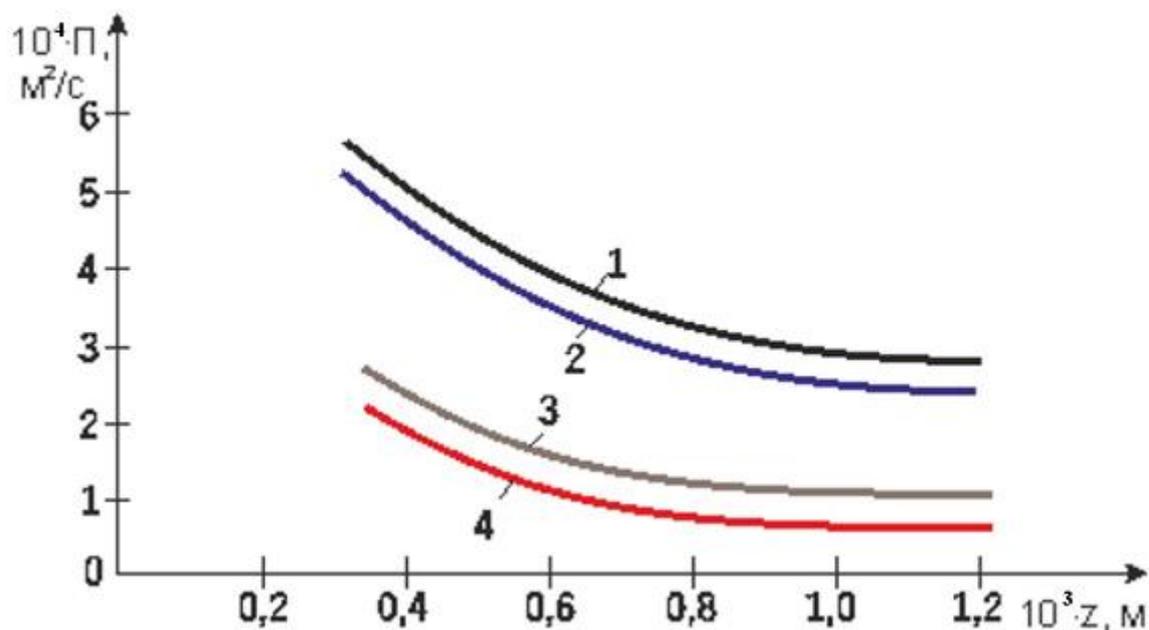
$$\Pi = \frac{A \times q_0^{0,3}}{f^{0,1} \times z}, \quad (13)$$

где  $A = \text{const}$ , зависящая от единиц измерения ( $A = 1,8 \times 10^{-9}$  в диапазоне поверхностной плотности энергии  $q_0 = (0,1..7,5) \times 10^7 \text{ Вт/м}^2$ ). [3]



1 –  $x = 14,5 \text{ мм}$ ,  $z = 0$ ; 2 –  $x = 0$ ,  $z = 0$ ; 3 –  $x = 5 \text{ мм}$ ,  $z = 0,8 \text{ мм}$ ; 4 –  $x = 5 \text{ мм}$ ,  $z = 0$

Рисунок 28 – Сравнительный график температур остывания и термокинетической диаграммы распада аустенита ( $P_{\text{эфф}} = 5 \text{ кВт}$ ,  $L = 15 \text{ мм}$ ,  $V = 40 \text{ мм/с}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ )



1 –  $q = 8 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>,  $f = 50$  Гц; 2 –  $q = 8 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>,  $f = 200$  Гц; 3 –  $q = 7 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>,  $f = 50$  Гц; 4 –  $q = 7 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>,  $f = 200$  Гц;

Рисунок 29 – Зависимость производительности  $\Pi = 2 \times L \times V_{\min}$  от максимальной глубины закалики  $z$

«Для определения параметров закалики описываемым методом предложены диаграммы и аппроксимационные формулы для расчета температуры, времени нагрева, глубины закалики, границ частотно-скоростных диапазонов в зависимости от параметров процесса. Для расчет глубины закалики можно использовать формулу:

$$z = \frac{A \times q}{f^{0,3}} \times \exp(-0,75) \times \frac{V}{f^{0,2} \times \sqrt{q}}, \quad (14)$$

где  $A = 3,1 \pm 0,7$ ;

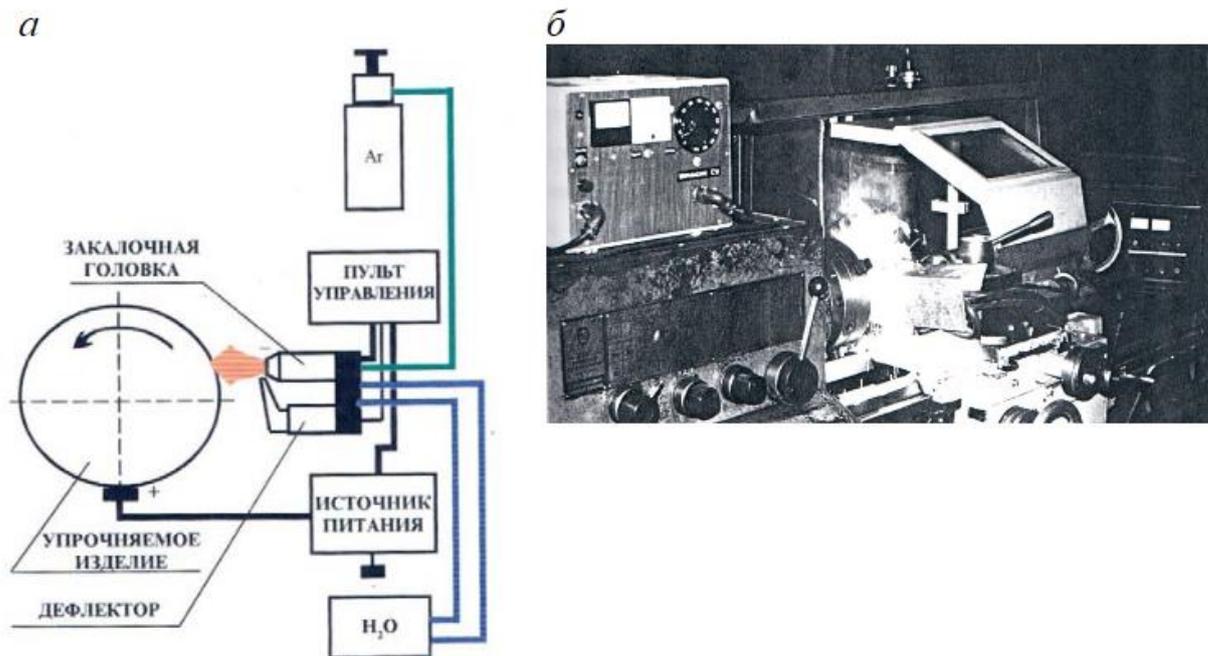
$q$  – мощность, кВт;

$f$  – частота сканирования, Гц;

$z$  – глубина закалики, мм». [3]

«Выявленные теоретические закономерности сканирующей термообработки подтверждены экспериментальными исследованиями на

системах плазменно-дугового взаимодействия со сталями среднеуглеродистого класса и антифрикционной латунью. Эксперименты проводились на разработанной установке для термоупрочнения металлов типа УТМ-3 (рисунок 30).



*а* – принципиальная схема; *б* – установка с манипулятором на базе токарного станка

Рисунок 30 – Установка для плазменного термоупрочнения

«В составе установки находятся следующие элементы:

- источник питания типа ВДУ-506 с падающими ВАХ, обеспечивающими номинальный ток не менее 300 А при ПВ = 60%;
- пульт управления с блоками импульсного возбуждения и управления дугой;
- плазмотрон либо газoeлектрическая горелка с механизмом перемешивания и сканирующим устройством (дефлектором);
- токосъемное щеточное устройство;
- электро-, газо- и водопроводящая аппаратура и контрольно-измерительные приборы;

– система принудительного охлаждения». [3]

«В качестве теплового источника использовалась плазменно-дуговая горелка, предназначенная для поддержания дугового разряда между поверхностью детали и неплавящимся вольфрамовым электродом (анодом), закрепляемым в корпусе плазмотрона посредством цангового зажима, через который осуществляется подвод тока и отвод тепла от электрода. Выходное напряжение холостого хода источника питания дуги составляет не менее 65 В, импульсного высокочастотного возбuditеля дуги (ИВД) – 20...30 кВ. Напряжение с выхода ИВД поступало в воздушный промежуток между электродом и деталью, после его электрического пробоя питание ИВД отключалось и в работу вступало сканирующее устройство (магнитный дефлектор). Дефлектор состоит из полого водоохлаждаемого магнитопровода и катушки (соленоида), питаемой переменным электрическим током. Для регулирования напряженности магнитного поля, создаваемого дефлектором, напряжение питания соленоида плавно изменялось в пределах 0...250 В (с катушкой на 110 В), что позволяло регулировать амплитуду сканирования дуги в пределах 20 мм». [3]

«В качестве плазмообразующей и защитной среды использовался аргон или смеси на основе аргона с азотом и другими газами. Расход газа регулировался в пределах 0,3...1,2 м<sup>3</sup>/ч, длина дугового промежутка – в пределах до 30 мм. В качестве манипулятора изделия в экспериментах применялся токарный станок типа 16К20 (рисунок 12, б), что позволило обрабатывать цилиндрические детали диаметром до 150 мм и длиной до 1 м, обеспечивая перемещение дуги в двух координатных осях по поверхности детали как за счет ее вращения, так и за счет перемещения суппорта станка с закрепленным на нем узлом термообработки (плазмотрон и дефлектор). Для водоохлаждения узла термообработки использовалась замкнутая водооборотная система с расходом 2...5 л/мин за счет подкачки воды помпой из резервуара». [3]

«Рассмотренная установка позволяет вести термообработку в диапазоне скоростей поступательного движения теплового источника 5...95 мм/с, мощности дуги от 3,2 до 11,0 кВт, при амплитуде сканирования до 20 мм и частоте 50Гц. Исследования по сканирующей термообработке, проведенные на сталях марок 40Х, Ст. 45, Ст. 50 и 9ХФ, показали увеличение поверхностной микротвердости на 150...250 НВ (30...35 HRC) и 20-25 единиц по Шору с неравномерностью величин по ширине зоны. Расчетные и экспериментально измеренные глубины закалки совпадают с точностью 15...20%». [3]

«Представленный метод термообработки имеет широкий спектр практического применения, реализуемого выбором конкретных режимов обработки и специальных конструкторов генераторов плазмы и устройств управления сканирующим устройством. С этой целью предлагается использовать плазмотрон с широким соплом-катодом (рисунок 31), в котором плазменная дуга горит в пространстве между металлом-анодом и соплом, перемещаясь по пластинам-катадам, питаемым переменным током, что позволяет при термообработке со сканированием высокой частоты (свыше 1 кГц) рассматривать схему нагрева плоским полосовым движущимся источником». [3]

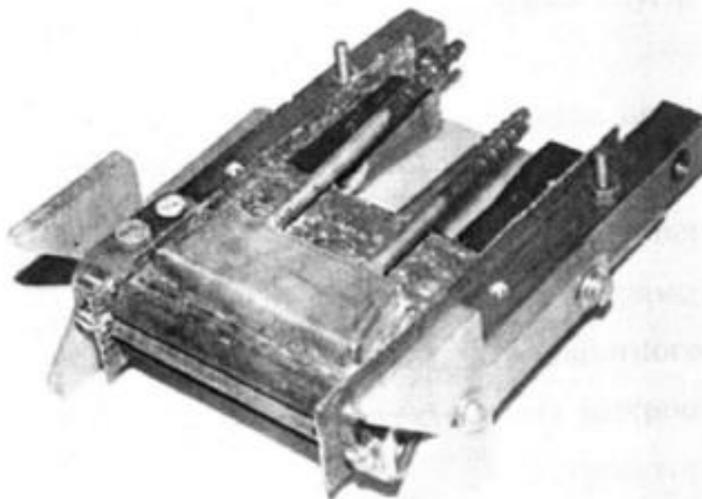
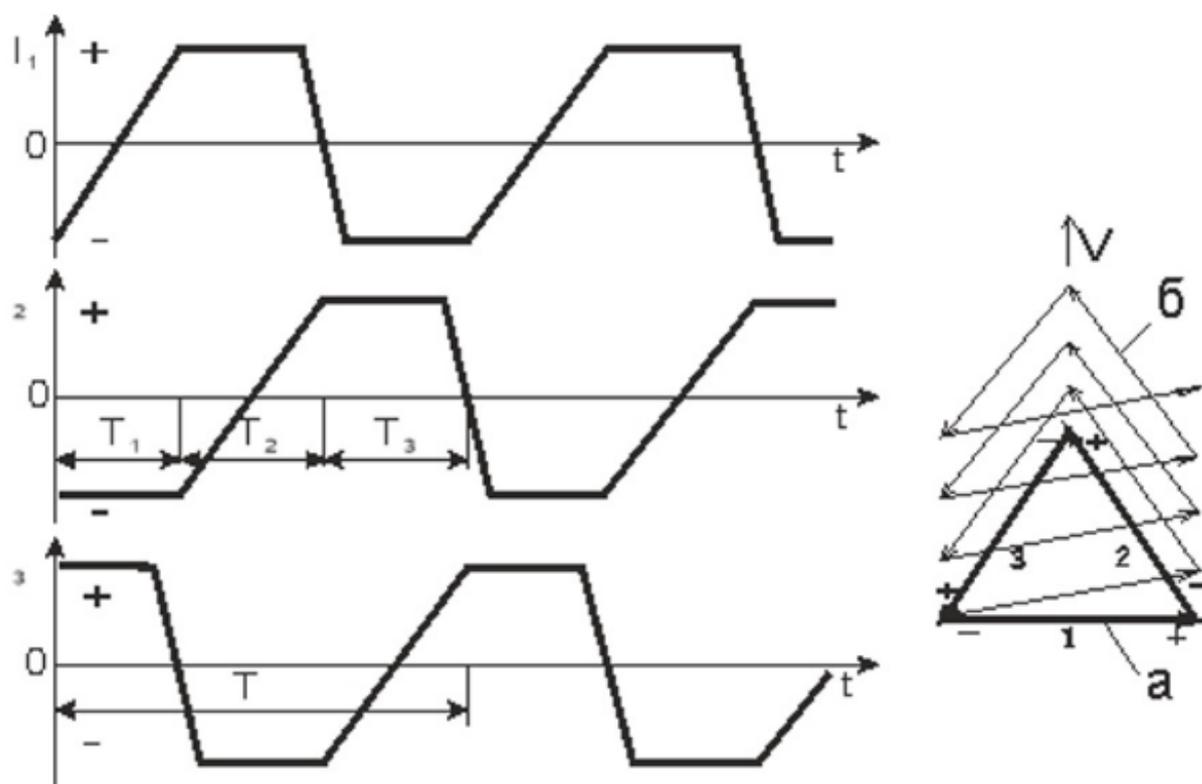


Рисунок 31 – Электродуговой плазмотрон с широким соплом-катодом

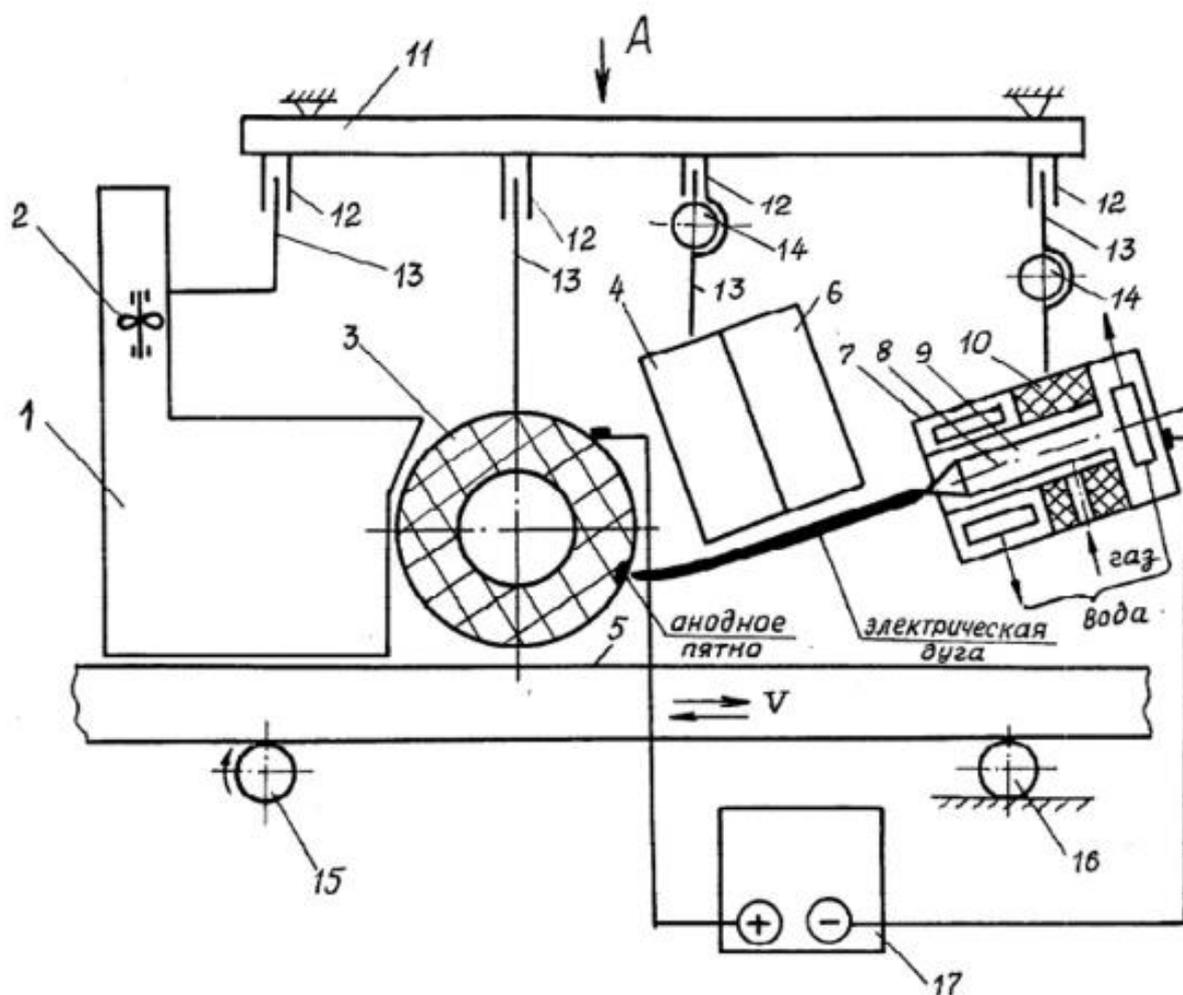
«Перспективным представляется и использование различных схем сканирования, когда пятно нагрева при перемещении по обрабатываемой поверхности движется по спиральной траектории с образующими спираль треугольниками, овалами или прямоугольниками, что позволит повысить качество обработки поверхностного слоя, создать структуру поверхности с заданным распределением упрочненных участков для получения специальных свойств, нанести специальный рисунок на поверхности в режиме микроплавления в виде узоров различной формы и так далее. Так, при питании катушек током трапециевидной формы (рисунок 32) на поверхности образуется узор треугольной формы (с наложением при движении источника дуги)». [3]



*a* – в неподвижной системе; *б* – в подвижной системе

Рисунок 32 – Схема питания трехфазного сканирующего устройства переменным током трапециевидной формы и характер перемещения теплового пятна по поверхности

«Модификация подобной автоматизированной технологии приведена на рисунке 33». [3]



1 – кожух с вентилятором; 2,3 – анодный узел; 4 – блок отжима электрической дуги от поверхности обрабатываемого металлического изделия; 5,6 – блок электромагнитной развертки; 7 – водоохлаждаемый катодный узел (в составе: 8 – центральный стержневой катод; 9 – сопло; 10 – корпус-изолятор; 11 – рама; 12 – направляющие; 13 – стойки); 14 – шарнирные соединения; 15 – привод; 16 – ролики; 17 – источник питания

Рисунок 33 – Способ плазменной термической обработки изделий

Согласно технологии, поверхность изделия нагревают электрической дугой с током 30...600 А, перемещаемой возвратно-поступательной (с амплитудой не более 250 мм над поверхностью изделия) переменным полем в направлении, перпендикулярном поступательному перемещению изделия (линейная скорость поступательного перемещения изделия относительно

электрической дуги – 1...250 мм/с). Кроме того, в прианодной области на дугу воздействуют постоянным магнитным полем, отжимая ее от поверхности изделия не менее чем на 3 мм. При этом анодное пятно располагают на аноде (на расстоянии 1...25 мм от ее поверхности в зависимости от формы обрабатываемого изделия), а ось катода направляют под углом к плоскости обработки. В результате горячие газы из прианодной области перемещаются над поверхностью изделия, нагревая и модифицируя ее свойства. Очевидно, что подобные автоматизированные методы термоупрочнения применимы только к деталям простой геометрической формы (плоским или телам вращения) и достаточно сложны в управлении.

«Среди известных технологий плазменной закалки, позволяющих вести термоупрочнение изделий сложной конфигурации, можно обратить внимание на многолетний опыт использования установки УДГЗ-200 (ООО «Русстанком») (рисунок 34)». [3]



Рисунок 34 – Установка плазменно-дуговой закалки УДГЗ-200

«В состав установки входит источник питания типа ВД-306 или УДГУ-251 со встроенными блоками возбуждения дуги и охлаждения, тележка для перемещения установки и газового баллона и плазменная горелка (плазмотрон) с коммуникационными кабелями и рукавом. Установка имеет следующие параметры: мощность – 7 кВт, максимальная сила тока источника – 350 А, максимальная сила тока закалки – 200 А, производительность – до 110 см<sup>2</sup>/мин, расход рабочего газа (аргона) – 15 л/мин, глубина закалки – до 2 мм, твердость закалки (зависит от марки стали)  $\leq 65$  HRC. Установка мобильна и позволяет проводить закалку сталей и чугунов, в том числе низкоуглеродистых сталей, по месту эксплуатации деталей, а малые габариты горелки позволяют добираться до труднодоступных мест». [3]

«Технология ручной закалки позволяет проводить локальное упрочнение подверженных износу участков. Оператор берет горелку в руки, подносит к изделию, возбуждает дугу и начинает равномерно перемещать горелку на расстоянии 20 мм вдоль поверхности полосами 7...14 мм с некоторым перекрытием. Скорость перемещения определяется по появлению эффекта «вспотевания» поверхности. Для удобства оператора предусмотрены двух и четырехтактные режимы работы. Возможна автоматизация закалки для тел вращения или порталов». [3]

Данный метод высокотемпературного упрочнения предлагается применять при обработке приспособлений крупных станков, таких как токарно-карусельные станки. Кулачки планшайбы таких станков очень удобно подвергать термообработке таким способом, так как имеется возможность локальной термообработки определенных поверхностей и не требуется каких-то специальных камер для выполнения термообработки.

В результате исследований нами было выявлено, что наиболее эффективными методами термического упрочнения деталей станочной оснастки являются лазерное и плазменное упрочнение. Детали из чугуна необходимо термообработать методом лазерного упрочнения, а стальные детали – плазмой.

## Заключение

Для увеличения износостойкости трущихся поверхностей технологической оснастки можно использовать термическую обработку, нанесение покрытий, поверхностное легирование, деформационное воздействие, комбинированную обработку.

Одним из наиболее эффективных способов изменения свойств деталей является изменение химического состава материала на его поверхности.

Производственный опыт показывает, что наибольший интерес в качестве износостойких покрытий на сегодняшний день представляют следующие соединения: карбиды, нитриды, бориды металлов; тугоплавкие металлы, такие как титан или хром; алмазоподобные соединения.

Хромирование выполняют в случае активной среды для повышения коррозионной стойкости.

Алмазоподобные покрытия ввиду их дороговизны наносят в основном на режущий инструмент. Поэтому наиболее популярным методом изменения износостойкости станочной оснастки является нанесение на поверхность различных карбидов, нитридов и боридов.

Огромный перечень составляют методы нанесения износостойких покрытий на детали. По своей сути методы, использующиеся для упрочнения рабочих поверхностей, имеют существенные различия в применяемых источниках энергии (лазерный луч, низкотемпературная плазма и другие), рабочих средах (воздух, вакуум и другие) и так далее.

Нанесение таких покрытий, как карбид вольфрама, происходит воздушно-плазменным напылением, высокоскоростным воздушным поливом или высокоскоростным кислородным топливом. Такие методы нанесения позволяют снизить пористость композитного покрытия, повысить твердость и устойчивость к адгезии.

Другим способом нанесения покрытий является электрохимическое осаждение. Процесс электрохимического осаждения в настоящее время

получает большую популярность из-за того, что при этом способе нанесения покрытий тратится меньшее количество электроэнергии, а покрытие по качеству не уступает, а иногда даже превосходит предыдущие способы.

Эффективным способом увеличения износостойкости поверхностей является воздействие на них высокотемпературным лазерным лучом. В этом случае обрабатываемая поверхность нагревается до высоких температур и происходит термическая обработка, то есть преобразование структуры материала основы. В частности, в сталях и чугунах преобразованию подвергается углерод из одного состояния в другое. Эти преобразования приводят к изменению физико-механических свойств поверхностного слоя деталей и к изменению их износостойкости при дальнейшем использовании в составах машин.

Эффективным способом термической обработки стальных деталей станочной оснастки является метод плазменной закалки. Этот метод термообработки имеет широкий спектр практического применения, реализуемого выбором конкретных режимов обработки и специальных конструкторов генераторов плазмы и устройств управления сканирующим устройством. Он характеризуется тем, что ему не нужна специальная камера, поэтому этот способ очень удобен для термообработки деталей приспособлений крупных станков, таких как кулачки планшайб токарно-карусельных станков.

По результатам работы сделать следующие выводы:

- наиболее эффективным видом нанесения покрытий на поверхность станочной оснастки является плазменное напыление;
- наиболее недорогим нанесением износостойких покрытий является электрохимическое осаждение;
- наиболее эффективным методом поверхностного упрочнения чугунных деталей является лазерное упрочнение;
- наиболее эффективным способом поверхностного упрочнения стальных деталей крупных станков является плазменное упрочнение.

## Список используемой литературы

1. Адашкин А.М. Влияние режима термической обработки на жаростойкость сплава на основе хрома при высокотемпературном окислении на воздухе / А.М. Адашкин, В.Н. Бутрим, В.С. Кубаткин, И.Ю. Сапронов. «Вопросы материаловедения», №4(88), 2016. – С. 625-631.
2. Адашкин А.М. Повышение стойкости технологической оснастки для высокотемпературной термической обработки / А.М. Адашкин, В.С. Кубаткин. – Вестник МГТУ «Станкин», №3(62), 2022. – С. 87-90.
3. Анахов С.В. Плазменные инструменты в машиностроительных технологиях : монография / С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин. – Екатеринбург : Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2023. – 189 с.
4. Богуслаев В.А. Повышение ресурса модулями технологическими методами / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, А.Я. Мовшович [ и др.]. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2003. – 269 с.
5. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента : учебник для вузов. 2-е изд. – М. : Инновационное машиностроение, 2023. – 368 с.
6. Григорьянц А. Г. Технические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Щиганов, А.И. Мисюров. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2006. - 664 с.
7. Должиков В.П. Технологии наукоемких машиностроительных производств : учебное пособие для вузов / В.П. Должиков. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 304 с.
8. Инженерия поверхностей трения : учебное пособие / Ю.А.Харламов, Д.А.Вишневский, А.П.Жильцов, А.В.Бочаров. — Липецк : Липецкий ГТУ, 2020. — 208 с.
9. Ищенко Г.И. Применение упрочняющих покрытий для повышения износостойкости направляющих элементов технологической

оснастки / Г.И. Ищенко, А.Я Мовшович, Н.К. Резинченко // Машинобудування: Збірник наукових праць. 2010. № 5. С. 96-105.

10. Корнилова А.В. Исследование процессов накопления повреждаемости в деталях кузнечно-прессового оборудования и инструмента магнитными методами / А.В. Корнилова, И.М. Идармачев // Известия МГТУ «МАМИ», Серия «Технология машиностроения», 2013. №2(16). Т. 2. – С. 187-191.

11. Кравцова Е.А. Применение тонкослойных полимерных покрытий при изготовлении и восстановлении деталей машин / Е.А. Кравцова, С.А. Феськов // Вектор науки ТГУ. №4 (34). 2015. – С. 31-36.

12. Огин П.А. Повышение эксплуатационных характеристик деталей из чугунов с применением закалки оптоволоконным лазером / Вестник НГИЭИ. 2015. №12(55). С. 55-58.

13. Селищев А.И. Моделирование объемной штамповки кольцевой поковки // Всероссийская молодежная конференция «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2012)»: сб. докл. – М. : МГТУ «СТАНКИН», 2012. Т. 2. – С. 153-158.

14. Селищев А.И. Повышение стойкости оснастки для горячей объемной штамповки / А.И. Селищев, Л.К. Набиуллина, А.В. Корнилова // Вестник МГТУ «Станкин» №3(30), 2014. – С. 58-61.

15. Синенкова С.Р. Высокопроизводительная и экологически малоопасная технология формирования композиционных электрохимических покрытий кобальт-карбид фольфрама / С.Р. Синенкова, С.Ю. Киреев, М.В. Глебов // Вестник Пензенского государственного университета. №2(38), 2022. – С. 50-57.

16. Феськов С.А., Феськов С.С. Способ получения слоистого изделия из полимерных материалов : патент РФ № 2522009: заяв. 04.10.2012; опубл. 10.07.2014.

17. Adaskin A.M. Strain Hardening Curves and Mechanical Properties of a Chromium-Base Refractory Alloy as a Function of Heat Treatment and Test

Temperature / V.N. Butrim, V.S. Kubatkin, I.Yu. Saprnov. Metal Science and Heat Treatment / January 2016, Volume 57.

18. Anup Kumar Keshri and Arvind Agarwal, Wear Behavior of Plasma-Sprayed Carbon Nanotube-Reinforced Aluminum Oxide Coating in Marine and High-Temperature Environments, *J. Therm. Spray Technol.*, 2011, 20(6), 1217-1230.

19. Bellie V., Suresh J. Corrosion Properties of Cold-Sprayed Tantalum Coatings, *J. Therm. Spray Technol.*, 2009, 18(1), 75 – 82.

20. Bellie V., Suresh J., Rangunath L. HVOF Sprayed Mullite Coatings for Use In Extreme Environments. *Journal of Thermal Spray and Engineering*, 2(1): 43-49/

21. Bolelli G. [et al]. Tribology of hard metal coatings with HVOF and HVAF WC-10Co4Cr deposition: comparative evaluation // *Technology of Surfaces and Coatings*. 2015. Vol. 265. P. 125–144.

22. Branagan D. J., Breitsameter M., Meacham B. E., Belashchenko V. High-Performance Nanoscale Composite Coatings for Boiler Applications, *J. Therm. Spray Technol.*, 2005, 14 (2), 196-204.

23. Chen Jiang, Eric H. Jordan, Alan B. Harris, Maurice Gell, and Jeffrey Roth, Double-Layer Gadolinium Zirconate/YttriaStabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings, Deposited by the Solution Precursor Plasma Spray Process, *J. Therm. Spray Technol.*, 2015, 24(6), 895-906.

24. Heli Koivuluoto, JonneNa'kki, and Petri Vuoristo, Corrosion Properties of Cold-Sprayed Tantalum Coatings, *J. Therm. Spray Technol.*, 2009, 18(1), 75 – 82.

25. Hussain T., McCartney D. G., Shipway P. H., Marrocco T. Corrosion Behavior of Cold Sprayed Titanium Coatings and Free Standing Deposits, *J. Therm. Spray Technol.*, 2011, 20(1-2), 260- 274.

26. Jin Kawakita, Seiji Kuroda, Takeshi Fukushima, Toshiaki Kodama, Development of dense corrosion resistant coatings by an improved HVOF spraying process, *Science and Technology of Advanced Materials*, 2003, 4, 281–289.

27. Jouini N., Revel P., Mazeran P.-E. and Bigerelle M. (2013). "The ability of precision hard turning to increase rolling contact fatigue life." *Tribology International*, 59, 141–146.
28. Loginov N.Yu., Gulyaev V.A., Khudyakova O.Yu. Optimisation of electro-spark coating method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. C. 012016.
29. Myalska H. [et al.]. Tribological behavior of WC-Co HVOF-sprayed composite coatings modified by nano-sized TiC addition // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 371. P. 401–416.
30. Paul S., Syrek-Gerstenkorn B. Can Thermally Sprayed Aluminum (TSA) Mitigate Corrosion of Carbon Steel in Carbon Capture and Storage (CCS) Environments, *J. Therm. Spray Technol.*, 2017, 26, p 184-194.
31. Perepezko J. H., Sossaman T. A., Taylor M. Environmentally Resistant Mo-Si-B-Based Coatings, *J. Therm. Spray Technol.*, 2017, 26, 929–940.
32. Richard Piolaa, Andrew S. M. Angb, Matthew Leighc, Scott A. Wadeb, A comparison of the antifouling performance of air plasma spray (APS) ceramic and high velocity oxygen fuel (HVOF) coatings for use in marine hydraulic applications, *Biofouling*, 2018, 34(5), 479–491.
33. Sekar Saladi, Jyoti V. Menghani, Satya Prakash, Characterization and Evaluation of Cyclic Hot Corrosion Resistance of Detonation-Gun Sprayed Ni-5Al Coatings on Inconel, *J. Therm. Spray Technol.*, 2015, 24(5), 778-788.
34. Shrestha S., Sturgeon A. J. The use of advanced thermal spray processes for corrosion protection in marine environments, *Surface Engineering*, 2004, 20(4),237-243.
35. Sidhu T.S., Malik A., Prakash S., and Agrawal R.D. Oxidation and Hot Corrosion Resistance of HVOF WC-NiCrFeSiB Coating on Ni- and Fe-based Super alloys at 8000C, *J. Therm. Spray Technol.*, 2007, 16(5-6), 844-849.
36. Suresh R., Basavarajappa S. and Samuel G. L. (2012). "Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool" *Measurement*, 45, 1872–1884.

37. Vasudev Hitesh, Thakur Lalit, Bansal Amit, Singh Harmeet, Zafar Sunny. High temperature oxidation and erosion behaviour of HVOF sprayed bi-layer Alloy-718/NiCrAlY coating, *Surf. Coat. Technol.*, 2019, 362, 366-380.
38. Vignesh S., Shanmugam K., Balasubramanian V., Sridhar K. Identifying the optimal HVOF spray parameters to attain minimum porosity and maximum hardness in iron based amorphous metallic coatings, *Defence Technology*, 2017, 13, 101-110.
39. Viswanath B., Vijayarangan S. Characterization studies of mullite coatings on cast aluminum, *J. Therm. Spray Technol.*, 2011, 21 (2), 325-334.
40. Wang Y., Zheng Y.G., Kea W., Sun W.H., Hou W.L., Chang X.C., Wang J.Q. Slurry erosion–corrosion behaviour of highvelocity oxy-fuel (HVOF) sprayed Fe-based amorphous metallic coatings for marine pump in sand-containing NaCl solutions, *Corrosion Science*, 2001, 53, 3177–3185.

Приложение А

Публикация



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



**ПРОБЛЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ:  
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ,  
МАТЕРИАЛЫ, МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ**

Сборник статей по материалам  
Всероссийской научно-практической конференции  
11-12 октября 2024 г.



Махачкала 2024 г.

Рисунок А.1 – Первая страница публикации

## Продолжение Приложения А

УДК 621.  
ББК 34,6  
П78

**ПРОБЛЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ, МАТЕРИАЛЫ, МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ.**  
Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции. 11-12 октября 2024г., г. Махачкала: ДГТУ, 2024. 223 с.

В сборнике представлены материалы Всероссийской научно-практической конференции проведенной 11-12 октября 2024 года в г. Махачкала. Материалы конференции представляют как научный, так и практический интерес для научных работников, аспирантов и для инженерного персонала предприятия.

### РЕЦЕНЗЕНТЫ

Саркаров Таджидин Экберович – д.т.н., профессор кафедры ТиОЭ ФГБОУ ВО «ДГТУ»  
Гамзатов Гаирбек Абдулкеримович– к.т.н., генеральный директор ОАО «Авиаагрегат»

### ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Баламирзоев Н.Л., к.э.н., доцент, ректор ФГБОУ ВО «ДГТУ», к.э.н., доцент, председатель  
Алиева Л.И., д.т.н., профессор, «ДГМА», РФ, г. Краматорск  
Ахмедпашаев М.У., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «ДГТУ», г. Махачкала  
Жуков В.А., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «ГУРМФ им. адмирала С.О. Макарова» г. Санкт-Петербург  
Каргин С.А., к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «АГТУ», РФ, г. Астрахань  
Мамутов В.С., д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого», РФ, г. Санкт-Петербург  
Петрова Л.Г., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «МАДГТУ (МАДИ)», РФ, г. Москва  
Рябичева Л.А., д.т.н., профессор, ГОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля, РФ, г. Луганск  
Чудина О.В., профессор, д.т.н., ФГБОУ ВО «МАДГТУ (МАДИ)», РФ, г. Москва  
Гамзатов Г.А., к.т.н., директор ОАО завод «Авиаагрегат», РД г. Махачкала.

### ЧЛЕНЫ ОРГАНИЗАЦИОННОГО КОМИТЕТА

Санаев Н.К. - к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «ДГТУ», г. Махачкала, председатель  
Махмудов К.Д. – к.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «ДГТУ», г. Махачкала, зам. председателя.  
Юсуфов Ш.А., к.т.н., доцент, проректор по «НИИД» ФГБОУ ВО «ДГТУ», г. Махачкала  
Ахмедпашаев М.У., д.т.н., профессор ФГБОУ ВО «ДГТУ», г. Махачкала  
Дибиров С.Ю., к.т.н., доцент ФГБОУ ВО «ДГТУ», г. Махачкала  
Сальницкий Ф.А., старший преподаватель ФГБОУ ВО «ДГТУ», г. Махачкала

ISBN 978-5-907837-73-7

Печатается согласно постановления Ученого совета ФГБОУ ВО «ДГТУ»  
от 28 ноября 2024 г. Протокол №3

© Дагестанский государственный технический университет, 2024  
© Оформление. ИП Тагиев Р.Х., 2024

Рисунок А.2 – Вторая страница публикации

## Продолжение Приложения А

### СОДЕРЖАНИЕ

№		Стр
1	Точность технологических наладок с применением многогранных спутников автоматических линий Левашкин Д.Г., Блохин М.А.	7
2	Основание формирования групп методов продольного бесцентрового шлифования по признакам однородности Малинин П.В., Бочкарев П.Ю.	13
3	обработки на основе машинного обучения Расторгуев Д.А.	17
4	Расширение технологических возможностей диагностики процессов Конструкторско-технологическое обеспечение долговечности поршней высокооборотных дизелей Жуков В.А., Санаев Н.К., Жуков А.А.	21
5	Способы повышения надежности гребных валов Нечай А.П., Жуков В.А.	26
6	Совершенствование конструктивных элементов ЦПГ судового малоразмерного двигателя Санаев Н.К., Махмудов К.Д., Егоров В.В.	30
7	Технологические особенности производства неразборных сферических подшипников скольжения Гасанов Б.Г., Конько Н.А., Баев С.С.	36
8	Исследование процессов увеличения износостойкости технологической оснастки Бабенко М.В., Логинов Н.Ю., Салабаев Д.Е.	42
9	Анализ гидроабразивного износа и структуры стали форсунок струйных насосов Петров В. А., Цветков Ю. Н., Баранов С. Г.	46
10	Принципы формализации проектных процедур технологического проектирования при ограниченной номенклатуре изделий Дибиров С.Ю.	51
11	Построение объектной среды автоматизации технологического проектирования инновационного машиностроительного производства Дибиров С.Ю., Магомедов А.И.	54
12	Современное оборудование и оснастка для затылования заборных конусов метчиков Курбанов А.З., Вагабов Н. М., Алимаров Л.М.	58
13	Влияние погрешностей изготовления резьбы метчика на точность обрабатываемой резьбы	64

Рисунок А.3 – Третья страница публикации

УДК 631.3.02.004.67

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УВЕЛИЧЕНИЯ  
ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАТКИ**

**БАБЕНКО М.В.**, студент  
«Тольяттинский государственный университет», РФ,  
г. Тольятти

**ЛОГИНОВ Н.Ю.**, к.т.н., доцент  
«Тольяттинский государственный университет», РФ,  
г. Тольятти

**САЛАБАЕВ Д.Е.**, к.т.н., доцент  
«Тольяттинский государственный университет», РФ,  
г. Тольятти

*Аннотация:* В работе представлен обзор способов повышения износостойкости технологической оснастки с помощью применения смазки, нанесением различных износостойких покрытий, упрочнением поверхностей методами пластического деформирования или модернизацией конструкции.

*Ключевые слова:* износостойкость, технологическая оснастка, модификация поверхности, упрочнение, покрытие.

Машиностроение является одной из ведущих направлений современной промышленности. В машиностроении важное значение придается технологической оснастке. От степени оснащённости машиностроительных производств приспособлениями зависит производительность этих предприятий.

Выход из строя приспособлений чаще всего происходит не из-за поломки его составных элементов, а из-за износа их поверхностей. Работа приспособлений связана с многократным трением одной поверхности об другую в течение довольно большого промежутка времени, в результате чего происходит изнашивание этих поверхностей.

Снижение коэффициента трения между взаимодействующими поверхностями возможно с помощью применения смазки, нанесением различных износостойких покрытий, упрочнением поверхностей методами пластического деформирования.

Увеличение долговечности и надежности работы машин является важной задачей современного машиностроения.

Увеличение износостойкости поверхности деталей машин может осуществляться множеством способов, которые можно разделить на две следующие группы: нанесение износостойких покрытий (то есть нанесение на поверхность другого материала, отличающегося по свойствам от материала основы) и модификация поверхностного слоя материала основы (здесь поверхностный слой материала подвергается какой-то обработке, например термической, после которой химический состав не меняется, а меняются свойства этого поверхностного слоя).

Авторами [1] предлагается для упрочнения деталей технологической оснастки применять методы вакуумно-плазменного нанесения покрытий, а также детонационно-газовый способ.

В плазменно-дуговой технологии в последнее время бурно развивается направление ионной имплантации. Эта технология заключается в обработке поверхности пучком высокоэнергетических ионов, в составе которых имеются частицы материала, которые необходимо внедрить в поверхностный слой покрываемой поверхности. Такое покрытие имеет диффузионный характер сцепления с подложкой.

Авторами [2] утверждается, что наиболее эффективным является гибридный способ нанесения покрытий, сочетающий ионную имплантацию и ионно-плазменный метод, который назвали методом плазмохимической имплантации. Он имеет ряд преимуществ: для него характерна глубокая газовая диффузия, достигающая 0,3 мм; хорошая диффузия материала покрытия с основным материалом; наличие четко определяемого переходного слоя.

Процесс нанесения покрытий ионно-плазменным методом имеет много параметров, каждый из которых может оказать влияние на формируемое покрытие. Например, только изменением давления в камере с вакуумом при нанесении однослойного и многослойного покрытий на основе нитрида титана можно изменить фазовый состав титана (Ti) и нитрида титана (TiN): в многослойном соответственно 15 и 85%, а в однослойном – 46 и 54%. [2]

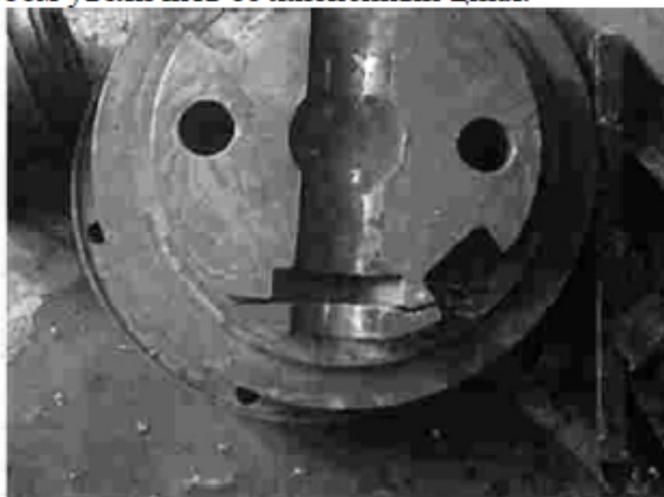
Моделирование процесса штамповки на стадии проектирования штамповой оснастки, подбор режимов штамповки, а также других нюансов процесса позволяет заранее спрогнозировать возможные риски и устранить их при изготовлении штамповой оснастки. На этом

## Продолжение Приложения А

этапе можно исключить или хотя бы замедлить процесс появления трещин.

А вот появление усталостных трещин является более сложным процессом, который спрогнозировать куда труднее. В процессе штамповки от нагретого материала теплота передается штамповой оснастке, которая нагревается. Далее при окончании работы штампа эта оснастка остывает. Таким образом, имеется проблема цикличности нагрева и остывания штамповой оснастки, в результате чего появляются разгарные трещины. Данный негативный фактор частично устраняют предварительным нагревом штамповой оснастки перед началом работы. Но при этом есть вероятность перегрева, который снижает износостойкость штампа. [3]

Для внутреннего охлаждения штамповой оснастки применяют смазочно-охлаждающие жидкости, которые подают в специальные отверстия, заложенные конструкторами на стадии проектирования (рисунок 1). Это усложняет конструкцию штамповой оснастки, но является способом увеличить ее жизненный цикл.



*Рисунок 1 – Конструкция штамповой оснастки с отверстиями для подачи СОЖ*

Одним из наиболее действенных способов поддержания работоспособности штамповой оснастки является метод комбинированного адаптивного охлаждения. Он включает с себя и внутреннее и наружное охлаждение, а также контроль термодатчиками расхода СОЖ. Данный способ позволяет снизить влияние на штамповую оснастку термоциклических нагрузок.

## Продолжение Приложения А

На стадии проектирования штамповой оснастки с применением САПР можно снизить риски быстрого выхода ее из строя путем прогнозирования течения деформируемого металла в полости штампа. [4] Путем выбора оптимальных размеров и формы заготовки можно достигнуть наиболее полного заполнения полостей штампов материалом получаемых заготовок, что снизит количество получаемого облоя и увеличит износостойкость штампа. Введение в конструкцию штампа переменного по толщине облойного мостика снижает нагрузки, что снижает износ.

Поверхности станочных приспособлений упрочняют методом электроискрового легирования. [5] При этом формируется слой металла, переносимый легирующим электродом, а также образуется переходный слой, содержащий и материал легирующего электрода, и материал основы. Таким образом, свойства поверхностного слоя изменяются. Этот метод также является эффективным для увеличения ресурса технологической оснастки.

### *Литература:*

1. Ищенко Г.И. Применение упрочняющих покрытий для повышения износостойкости направляющих элементов технологической оснастки / Г.И. Ищенко, А.Я Мовшович, Н.К. Резинченко // Машинобудування: Збірник наукових праць. 2010. № 5. С. 96-105.
2. Богуслаев В.А. Повышение ресурса модулями технологическими методами / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, А.Я Мовшович [и др.]. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2003. – 269 с.
3. Селищев А.И. Повышение стойкости оснастки для горчей объемной штамповки / А.И. Селищев, Л.К. Набиуллина, А.В. Корнилова // Вестник МГТУ «Станкин» №3(30), 2014. – С. 58-61.
4. Селищев А.И. Моделирование объемной штамповки кольцевой поковки // Всероссийская молодежная конференция «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2012)»: сб. докл. – М. : МГТУ «СТАНКИН», 2012. Т. 2. – С. 153-158.
5. Логинов Н.Ю. Исследование трибологических характеристик образцов с покрытием, нанесенным электроискровым методом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. №2 (1146). – С. 67-70.