

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

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением
и родственные процессы»
(наименование)

22.04.01 «Материаловедение и технология материалов»
(код и наименование направления подготовки)

«Сварка и пайка новых металлических и неметаллических
неорганических материалов»
(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Исследование и разработка технологического процесса
восстановления валов в условиях АО «Сызранского
нефтеперерабатывающего завода»

Студент

И.И. Апполинаров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

доктор технических наук, доцент, А.И. Ковтунов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Содержание:

Введение	3
1 Анализ антикоррозионных покрытий	11
1.1 Анализ физических и механических свойств основного металла вала и устройство насоса НК 560/335.....	11
1.2 Назначение антикоррозионных покрытий и их классификация	15
1.3 Способы нанесения антикоррозионных покрытий и материалы, применяемые в качестве защитных	17
1.3.1. Разновидности способов нанесения антикоррозионных покрытий	17
1.3.2. Разновидности материалов антикоррозионных покрытий.....	46
2 Методика исследований процессов и свойств активированной дуговой металлизации, газопламенного и плазменного напыления покрытий валов насосного оборудования	73
2.1 Методика проведения исследования процессов активированной дуговой металлизации, газопламенного и плазменного напыления	73
2.2 Методика исследования химического состава напыленных антикоррозионных покрытий	86
2.3 Методика исследования механических и эксплуатационных свойств напыленных антикоррозионных покрытий.....	88
2.3.1 Методика исследования механических свойств напыленных антикоррозионных покрытий	88
2.3.2 Методика исследования эксплуатационных свойств напыленных антикоррозионных покрытий	89
3 Результаты проведенных исследований процессов активированной дуговой металлизации, газопламенного и плазменного напыления антикоррозионных покрытий	94
3.1 Геометрические параметры напылённых покрытий	94
3.2 Химический состав напыленных антикоррозионных покрытий	98
3.3 Результаты исследования механических и эксплуатационных свойств напыленных антикоррозионных покрытий.....	100
3.3.1 Результаты исследования механических свойств антикоррозионных покрытий.....	100
3.3.2 Результаты исследования эксплуатационных свойств антикоррозионных покрытий.....	102
Заключение.....	109
Список используемой литературы.....	112

Введение

Современные нефтеперерабатывающие предприятия, имея сложное, разнообразное и дорогостоящее оборудование, произведенное в России и за рубежом, расходуют большие средства на его ремонт и обслуживание. Дорогостоящее оборудование часто не обновляется и имеет небольшой остаточный ресурс. Для восстановления ресурса оборудования необходимо проводить ремонтные работы, связанные с заменой основных несущих узлов и деталей. Детали могут закупаться у заводов изготовителей или производиться своими силами.

На предприятиях нефтеперерабатывающей промышленности требования к надёжности работы технологического оборудования возрастают постоянно, потому что от этого зависит безопасность обслуживающего персонала, а также надёжность и непрерывность технологических процессов, от соблюдения параметров которых, напрямую зависит качество выпускаемой продукции. Обновление насосно-компрессорного парка и закупка нового оборудования требует больших вложений, а это повышает себестоимость выпускаемой продукции и понижает конкурентоспособность предприятия.

Несмотря на разнообразие оборудования и разнотипность деталей, конструктивно они состоят из унифицированных частей, к которым предъявляются определённые технические требования. Технологические свойства заготовок металлических деталей и эксплуатационная надёжность находятся в зависимости от структуры, химического состава, свойств металла, сформированных технологическими операциями, начиная с начала получения металла и заканчивая этапами обработки и сборки. Необходимо особо подчеркнуть, что в этой цепочке обработок, изменяющих структуру и свойства металла, термическая, химико-термическая обработка, а также другие технологии поверхностного модифицирования деталей являются основными завершающими операциями, которые формируют механические

свойства, коррозионную стойкость, сопротивление износу и, как следствие, ресурс деталей в целом.

Таким образом, одним из реальных и доступных средств увеличения прибыли предприятия является применение в ремонтном производстве упрочняющих технологий, призванных повысить ресурс отдельных деталей и надежность технологического оборудования в целом. Используя индивидуальный подход не только к каждой детали, но и к каждой поверхности, можно разработать и предложить к использованию наиболее рациональный и экономически более выгодный способ восстановления.

Внедрение процесса восстановления антикоррозионной защиты позволяет рационально использовать металл и снижает расходы на его изготовление.

Мероприятия по антикоррозионной защите, в процессе ремонта валов, должны отражать требования по выбору защитных материалов, а также способы повышения сопротивления коррозии металлов. В настоящее время основными источниками коррозии металлов являются: повышенная влажность, агрессивные среды, атмосферные условия, а также результаты взаимодействия механических частей в оборудовании.

Касаясь стойкости к рабочим агрессивным средам, в качестве примера эффективных элементов покрытия можно привести хром и никель, содержание которых способствует образованию пассивных оксидных пленок, замедляющих коррозионное электрохимическое разрушение материала. Кроме того, хром является одним из элементов, повышающих стойкость стальных покрытий к высокотемпературной коррозии. Для защиты черных металлов (стальных изделий) желательно выбирать такой материал покрытия, который по отношению к подложке служит катодом. Цинк является типичным катодным покрытием при нанесении на сталь. Алюминий по отношению к стали может быть, как анодом, так и катодом в зависимости от состава агрессивной среды.

Наиболее распространенная электрохимическая коррозия характеризуется

постоянной величиной в единицу времени, поэтому срок службы покрытия во многом определяется его толщиной. Этот показатель выбирают из условий получения надежной защиты поверхности металла, минимальной стоимости покрытия и обеспечения предусмотренных режимов работы машин. Увеличение толщины покрытий сверх определенной величины практически не повышает защитных свойств, снижает прочность сцепления покрытий с основным металлом, затрудняет сочленение кинематических пар и повышает стоимость защиты. Поэтому толщину покрытий оговаривают в технической документации на изделие, государственных стандартах и нормалях для типовых изделий.

Равномерность покрытия на поверхности изделия также является важным фактором работоспособности нанесенного материала, так как процесс коррозионного разрушения обычно начинается на участках поверхности с более тонким нанесенным слоем. Вопрос равномерности особенно актуален при газотермическом напылении покрытий, характеризующихся по сравнению с наплавкой повышенной пористостью, что облегчает перемещение агентов коррозии в глубь покрытия и к основному металлу с активизацией коррозионного разрушения [3].

В настоящее время выделяют основные направления для исключения и предотвращения образования коррозии деталей насосного оборудования:

– Легирование металла, путем ввода легирующих элементов, либо замена его на более коррозионностойкие материалы. Достоинствами данного способа являются увеличение износостойкости и достаточное повышение коррозионных свойств в разных средах эксплуатации и атмосферных условиях

– Защитные покрытия (металлические и неметаллические) органического или неорганического происхождения. Данный способ получил самое широкое распространение по причине своей многофункциональности. Основа данного способа заключается в создании ограждения между

основным материалом (подложкой) и коррозионной средой, путем нанесения защитных покрытий

– Введение ингибиторов (веществ, замедляющих скорость реакции). Происходит за счет введения компонентов в коррозионную среду, которые в свою очередь уменьшают скорость коррозии. К недостаткам данного метода можно отнести ограниченное применение при сравнительно малых объемах коррозии.

– Гальваническая защита. Данный способ используют для надления металлов защитными функциями в широких условиях эксплуатации, а также при небольших износах производят восстановление поверхностей деталей. При данном способе затрудняется определение механических свойств покрытия по причине расположения основы непосредственно под покрытием. Физические и механические свойства осаждаемого и основного металла значительно отличаются между собой.

В настоящей работе рассматриваются способы по увеличению ресурса ответственных деталей насосно-компрессорного оборудования. Внедрение предложений в производство позволит повысить надёжность работы насосно-компрессорного оборудования и снизить затраты на ремонт и закупку новых деталей.

В связи с большой конкуренцией на рынке, вопрос оптимизации расходов на обслуживание и ремонт крайне актуален для всех. Рыночная экономика диктует необходимость снижения себестоимости выпускаемой предприятием продукции, в том числе, за счёт снижения продолжительности ремонта оборудования и увеличения межремонтного пробега. Необходимость увеличения периода безостановочной работы технологических установок и, как следствие, повышение надёжности оборудования вступает в прямое противоречие с наметившейся тенденцией к снижению качества поставляемых материалов и оборудования. Вместе с тем, с развитием новых ремонтных технологий появилась возможность

увеличивать надёжность и ресурс оборудования, повышать устойчивость работы машин, сокращать время ремонта и повышать его качество.

На «Сызранском НПЗ» эксплуатируется около 850 технологических насосов и 100 компрессоров. Их наиболее нагруженные детали: валы и штоки, различных габаритных размеров и конструкций, имеют высокую стоимость и их замена увеличивает затраты на ремонт. Необходимо проанализировать эту проблему, найти пути увеличения ресурса деталей, и по возможности уменьшить производственные затраты.

Газотермическое напыление применяется для защиты поверхностей валов и штоков, подверженных коррозии и износу. Это, в основном, участки под резиновыми уплотнительными кольцами, а также защитные гильзы насосов, опорные, межколёсные и торцевые втулки длинномерных валов. В качестве наносимого материала при напылении используются различные порошки и проволоки.

До применения этих методов детали изготавливались и устанавливались на оборудование неупрочнёнными, или закупались у производителей насосно-компрессорного оборудования. При использовании покупных и неупрочнённых деталей, ресурс валов и штоков составлял от 1 до 2 лет. Основным материалом валов насосно-компрессорного оборудования, используемых на АО «Сызранский НПЗ», является конструкционная легированная сталь 40Х, которая не имеет достаточную прочность и коррозионную стойкость. Поэтому основной проблемой является формирование антикоррозионной и износостойкой защиты поверхности изделия.

Учитывая, что основные, рассмотренные выше металлические и неметаллические покрытия, обладают рядом недостатков, а именно:

- металлические:

– способ горячего нанесения – неравномерность толщины покрытия, отсутствие возможности нанесения покрытий на крупногабаритные

изделия, ввиду отсутствия соответствующих по размеру ванн, применение только в пищевой, медицинской или химической промышленности;

– диффузионные покрытия – высокий уровень загрязнений в материале покрытий; объем

камеры ограничивает размеры изделия; высокая дороговизна процесса;

– плакировочные покрытия – дороговизна, быстрая коррозия в зоне сварных швов, ограниченность применения, используется при изготовлении и ремонте элементов деталей, подверженных воздействию только агрессивных сред (грязи, шлаков, пара);

– гальванические покрытия – невысокая износостойкость и долговечность, высокая вероятность возникновения наводораживания основного материала, что приводит к снижению механических свойств изделий, длительность изготовления, воздействие вредных химических факторов, ограниченность размеров обрабатываемых изделий;

– металлизационные покрытия – высокая пористость, значительные потери металла при распылении, трудоемкость подготовительных операций, возможность окисления напыляемых металлов;

- неметаллические – низкая термостойкость, низкая механическая прочность, недостаточная влагостойкость, невысокая износостойкость, хрупкость [15, 16], то необходимо, для придания важнейших коррозионностойких свойств металлу применять металлизационные покрытия, которые не смотря на незначительные недостатки, отличаются качеством и характеризуются:

– долговечностью,

– высокой антикоррозионной стойкостью,

– адгезионной прочностью,

– возможностью применения и выдержки при разных внешних температурах,

- возможностью применения для защиты крупногабаритных и имеющих большую площадь поверхностей, находящихся в собранном виде. [16].

Металлизационные покрытия можно изготавливать следующими способами:

- плазменным напылением, газопламенным напылением. Основные особенности:

- в качестве материалов используют порошки, проволоки и прутки;
- характерна высокая скорость и равномерность плазменной струи (при плазменном напылении);
- при плазменном напылении применяется в основном инертный газ аргон, а при газопламенном горючие газы, в основном – ацетилен;
- материал (порошки, проволоки, прутки) вводится в плазменную струю плазматрона или пламя газовой горелки, в которых он расплавляется, напыляется и наносится на поверхность металла.

Недостатки:

- риск свертывания напыленного покрытия из-за разности температур плазменной струи и поверхности детали (при плазменном напылении);
 - процесс трудноконтролируемый и напыление ведется вручную, что требует высокой квалификации металлизатора и его визуального контроля (при газопламенном напылении);
 - высокая трудоемкость;
 - дороговизна порошковых материалов;
 - из-за неравномерности нагрева не применяется для напыления крупногабаритных деталей.
- Активированной дуговой металлизацией. Основные особенности:
- простота в обслуживании, универсальность: можно использовать сварочные и наплавочные проволоки;

- электрическая дуга создается при соприкосновении двух изолированных, находящихся под напряжением проволок;
- покрытия наносятся на детали любой формы и габаритов;
- высокая производительность.

Недостатки:

- выгорание легирующих элементов (применение для напыления проволок с избытком легирующих элементов, например проволока нихром НП Х20Н80, Св-20Х13, компенсирует их потери при выгорании). [17].

В качестве напыления способом активированной дуговой металлизацией предлагается применить: для подслоя сварочную проволоку нихром НП Х20Н80 ГОСТ 10543-98 Ø 1,6 мм; для основного коррозионного слоя сварочную проволоку Св-20Х13 ГОСТ 2246-70 Ø 1,6 мм.

В качестве напыления способом газопламенного напыления предлагается применить самофлюсующийся порошок марки Metco 18С.

В качестве напыления способом плазменным способом предлагается применить: для подслоя порошок марки Ni80Cr20 (нихром), для основного защитного слоя порошок марки $Al_2O_3 + TiO_2$.

На основании вышеуказанной проблемы целью работы является повышение срока эксплуатации валов оборудования АО «Сызранского нефтеперерабатывающего завода» за счет проведения исследований и разработки технологического процесса их восстановления.

1 Анализ антикоррозионных покрытий

1.1 Анализ физических и механических свойств основного металла вала и устройство насоса НК 560/335

Учитывая, что данной работой предлагается формирование и исследование надежной антикоррозионной и износостойкой защиты рабочих поверхностей валов насосно-компрессорного оборудования, то возникает необходимость подробнее ознакомиться с устройством насоса.

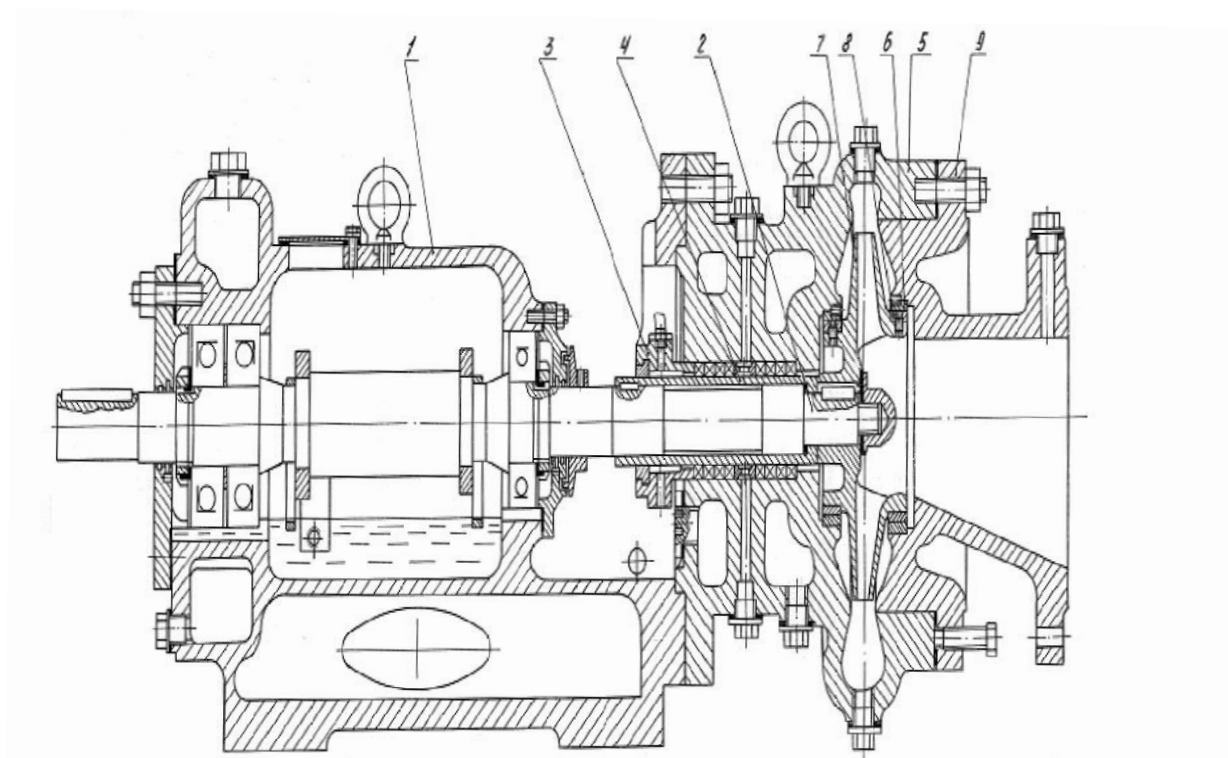


Рисунок 1 – Продольный разрез НК 560/335

- 1 – кронштейн, 2 – вал, 3 – крышка сальника, 4 – втулка защитная, 5 – корпус спиральный, 6 – кольцо уплотняющего патрубка, 7 – колесо рабочее, 8 – кольцо уплотняющее колеса рабочего, 9 – патрубок всасывающий.

Центробежные электронасосные агрегаты типа НК (рис.1) предназначены для подачи нефти и нефтепродуктов с температурой от 0 до плюс 200°С, содержащих твердые включения в количестве не более 0,1% по объему с размером частиц не более 0,2 мм. Агрегаты изготавливаются для эксплуатации во взрывоопасных и пожароопасных

зонах класса В-1а и ниже в соответствии с ПУЭ (Правила устройства электроустановок) для перекачивания жидкостей, пары которых образуют взрывоопасные смеси с воздухом категории ПА и ПВ по ГОСТ 30852.5-2002 и групп Т1, Т2, Т3, Т4 по ГОСТ 30852.11-2002 и должны быть укомплектованы двойным торцовым уплотнением .

Агрегат электронасосный состоит из насоса и двигателя, смонтированных на общей фундаментной плите (на раме). Все материалы, применяемые в насосах, для назначенных условий эксплуатации обладают термической стабильностью, соответствующей наименьшей и наибольшей температурам, при которых они будут эксплуатироваться. Вращающий момент ротору насоса передается от двигателя через упругую муфту, огражденную щитком. Насосы комплектуются взрывозащищенным двигателем, щитком ограждения с пластмассовой обшивкой с внутренней стороны, двойным торцовым уплотнением модульного типа « тандем», отбойником из неискрообразующего материала. Насос состоит из приводной и проточной частей. Приводная часть представляет собой опорный кронштейн, в котором на шарикоподшипниках вращается вал насоса; шарикоподшипники закрыты крышками. Проточная часть состоит из спирального корпуса, который крепится к фланцу опорного кронштейна, рабочего колеса, насаженного на конец вала, и всасывающего патрубка, присоединенного к спиральному корпусу. Насосы поставляются с напорным патрубком, направленным вертикально вверх. На напорном патрубке спирального корпуса предусмотрено резьбовое отверстие для присоединения манометра, заглушаемое при поставке пробкой. Рабочее колесо выполнено из двух дисков, соединенных лопатками. Передний диск имеет входное отверстие, задний – разгрузочные отверстия для выравнивания осевого давления. Рабочее колесо имеет уплотняющие кольца, которые в паре с уплотняющими кольцами, запрессованными в спиральном корпусе и всасывающем патрубке, образуют уплотнения для

уменьшения перетока жидкости из области высокого давления в область низкого давления. Рабочее колесо крепится на валу насоса гайкой, имеющей левую резьбу для предотвращения самоотвинчивания. На фланце патрубка имеется резьбовое отверстие для присоединения мановакуумметра, которое при поставке глушится пробкой.

Как правило, детали, а особенно валы, работают в одном из двух режимов – установившемся и переходном. Первый режим является основным и наиболее длительным, переходный режим (разгон, торможение) кратковременный, но определяющий срок службы, поскольку в этот период происходят основные повреждения и износ деталей.

Конструкция вала насоса НК 560/335 выполнена из конструкционной легированной стали 40Х.

Как известно, конструкционные легированные стали широко применяются для деталей машин и механизмов, работающих в условиях сложного нагружения, т.е. под действием статических, динамических, знакопеременных нагрузок или при их одновременном действии (автомобильная промышленность, сельскохозяйственное и транспортное машиностроение, строительство и т.д.).

Преимущества конструкционных легированных сталей:

- при одном и том же содержании углерода эти стали после термической обработки имеют более высокие характеристики прочности;
- прокаливаемость легированных сталей выше, так как большинство легирующих элементов стабилизирует аустенит, сдвигая С-образную диаграмму вправо;
- легирование тормозит распад аустенита и снижает критическую скорость закалки, поэтому закалку проводят в масле, а иногда на воздухе; снижает брак по закалочным трещинам и меньше коробление детали;

- легирование снижает температурный порог хладноломкости;
- возможно измельчение зерна, что увеличивает предел текучести и улучшает запас вязкости.

Недостатки конструкционных легированных сталей:

- склонность к отпускной хрупкости (хромистые и хромоникелевые стали);
- склонность к дендритной ликвации из- за малой скорости диффузии легирующих элементов, что приводит к анизотропии свойств после пластической деформации;
- худшая обрабатываемость резанием;
- высокая стоимость.

Представляющая интерес сталь 40Х является конструкционной легированной, применяемой для изготовления осей, валов, штоков, коленчатых и кулачковых валов и других улучшаемых деталей повышенной прочности. Данная сталь имеет соответствующий химический состав (табл. 1).

Таблица 1 - Химический состав стали 40Х. [37]

Массовая доля элементов не более, %							
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,36 – 0,44	0,17 – 0,37	0,5 – 0,8	0,3	0,035	0,035	0,8 – 1,1	0.3

Рассматривая механические свойства стали 40Х следует учитывать, что она обладает высокой твердостью и прочностью, структура может выдерживать существенную нагрузку и во время эксплуатации не подвергаться разрушению.

Наряду с механическими следует обозначить и основные физические свойства стали 40Х (табл. 2).

Таблица 2 - Показатели физических свойств стали 40Х, при воздействии на нее различных температур. [37]

Температура, Град	Удельное сопротивление, Ом·м	Упругость, МПа	Теплопроводность, Вт/(м·град)	Коэффициент линейного расширения, 1/Град	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/(кг·град)
20	210	2.14	-	-	7820	-
100	285	2.11	46	11.9	7800	466
200	346	2.06	42.7	12.5	7770	508
300	425	2.03	42.3	13.2	7740	529
400	528	1.85	38.5	13.8	7700	563
500	642	1.76	35.6	14.1	7670	592
600	780	1.64	31.9	14.4	7630	622
700	936	1.43	28.8	14.6	7590	634
800	1100	1.32	26	-	7610	664
900	1140	-	26.7	-	7560	-
1000	1170	-	28	-	7510	-
1100	120	-	28.8	-	7470	-
1200	1230	-	-	-	7430	-

Как видно из таблицы 2, при возрастании температуры, практически все показатели физических свойств данной стали снижаются, за исключением величин удельного сопротивления. [37]

Отсутствие достаточной коррозионной и абразивной стойкости материала конструкции валов может неблагоприятно сказаться на механических и эксплуатационных характеристиках работы изделия, поэтому крайне важно обеспечить надежную антикоррозионную и абразивную защиту данных изделий.

1.2 Назначение антикоррозионных покрытий и их классификация

Применение антикоррозионных покрытий сводится, в основном, к защите поверхностей металла от негативного воздействия внешней среды, т.е. к предотвращению разрушительной деятельности микроэлементов на

поверхности металлов. Антикоррозионные покрытия предназначены и для противодействия влиянию атмосферы, грунта, жидким средам (вода, кислоты), высоких температур, износу (возникает при постоянном контакте трущихся поверхностей). Антикоррозионные покрытия имеют и специальное назначение, например, в качестве защиты поверхностей металлов от цементации или азотирования. [18]

Данные покрытия подразделяются по следующим критериям:

- толщина: от 1 мкм до 8 и более мм;
- прочность связи покрытия с основанием: характеризуется прочностью сцепления;
- по материалам покрытий: неметаллические (сформированные на основе масел, смол, лакокрасочных веществ, полимеров и других подобных веществ), металлические (сформированные на основе чистых металлов, их сплавов и смеси, окислов карбидов, боридов и других подобных материалов);
- по применению: зависит от среды влияния на поверхность металла (воздействие атмосферы, жидкой среды, почв, высоких температур, механического взаимодействия);
- по способу нанесения покрытий (наиболее распространенные): горячее покрытие металлами (формируется путем погружения изделия в ванну с расплавленным металлом на короткое время), конверсионный, диффузионный (основан на внедрение атомов защитного вещества в металл в твердой, термомеханический (основан на плакировании защищаемого и защитного металла путем прокатки, протяжки иликовки при нагреве), жидкой или газообразной фазах путем воздействия высоких температур), наплавочный (основан на получение покрытий методами сварки, применяется в основном для восстановления изношенных поверхностей), керамический (основаны на нанесении на поверхность металла неметаллических порошков, газотермический (основан на получение покрытий методами напыления, путем распыления сжатым

газом частиц защитного металла на поверхность защищаемого металла, активно применяется при защите металла от коррозии), гальванический (покрытия получают электрокристаллизацией путем осаждения металлов на защищаемую поверхность), эмалевый, полимерный, гуммировочный, полимерных материалов под влиянием повышенных температур, предназначен для предотвращения влияния жидких химических веществ, воды, различных коррозионных сред), лакокрасочный (покрытия образуются путем нанесения на поверхность металла нескольких слоев лака или краски, применимы для защиты от коррозии и придания декоративного вида поверхности), вакуумно-плазменный (покрытия получают путем парофазного осаждения в специализированных камерах, широко используются в легкой промышленности, медицине).

Антикоррозионные свойства покрытий должны обеспечивать хорошую адгезию с основным металлом (сцепление), защищать его от проникновения элементов природной и агрессивной среды, иметь одинаковую толщину по всей защищаемой поверхности, т.е. иметь значительные физические (равномерность, пористость, сцепляемость) и механические свойства (твердость, прочность), а также обладать необходимыми декоративными качествами (внешний вид, цвет, отражательная способность). [16]

1.3 Способы нанесения антикоррозионных покрытий и материалы, применяемые в качестве защитных

1.3.1. Разновидности способов нанесения антикоррозионных покрытий

Способы формирования необходимых антикоррозионных покрытий должны быть не только коррозионноустойчивыми к негативному воздействию внешней среды, но и отвечать требованиям производительности, экономичности и удобства применения.

К рассмотрению предлагаются наиболее распространенные в промышленности способы формирования антикоррозионных металлических и неметаллических покрытий.

Способы нанесения неметаллических покрытий.

Гуммировочные защитные покрытия наносятся путем обкладки поверхностей. Гуммировочные материалы включают твердые и жидкие каучуки.

Гуммировочные покрытия обладают рядом недостатков:

- дороговизна в применении;
- наносят на конструкции определенной формы (с радиусом округления поверхностей не менее 5 мм);
- высокие требования к подготовке поверхности;
- применимы, как правило, для покрытия поверхностей негабаритных изделий;
- учитывая, что основным материалом покрытия является каучук, то, следовательно, покрытие имеет слабую стойкость против атмосферной коррозии, становится хрупким при воздействии повышенных температур.

Конверсионные покрытия: формируются в воде из труднорастворимых солей и окислов, получаемых в результате контакта растворов и основного металла. Подразделяется на фосфатные, хроматные, анодированные покрытия. Фосфатные применяются для подготовки стальных изделий перед окраской и осуществляется методом окунания в раствор. Хроматные покрытия наносят на поверхности цинковых, кадмированных, магниевых, алюминиевых деталей и осуществляется в растворе. Оксидирование применяется для защиты деталей из алюминия и его сплавов и формируется посредством электролитического образования на поверхности оксидного покрытия.

Существует несколько основных недостатков конверсионных покрытий:

- не применимы при работе с крупногабаритными сборными конструкциями;
- имеют невысокую адгезию при повышении температуры поверхности;
- обладают высокой степенью токсичности;
- зачастую не применяются в качестве самостоятельных, а служат, в основном, в виде подготовительного слоя перед нанесением других покрытий, например лакокрасочных.

Керамические покрытия: изготавливаются из металлов, а также окислов и карбидов, образованные путем применения плазменного напыления. Применяются для приобретения поверхностями жаростойких и износостойких свойств. Недостатки керамических покрытий:

- высокое содержание пор в покрытии;
- слабая адгезия;
- нестойкость структуры материала против перемены температуры. [19]

Эмалевые покрытия: нанесение данных покрытий осуществляется двумя способами – мокрым (порядок: наносят первый слой эмали распылением или обливом, сушат покрытие, обжигают в печах, охлаждают изделие, наносят покровную эмаль и снова обжигают в печах), сухим пудровым (грунтовочный материал в виде пудры многократно наносят на поверхность раскаленного изделия с последующим обжигом каждого слоя). [18]

Эмалевые покрытия наносятся на стальные и чугунные изделия. Данные покрытия устойчивы при влиянии различных кислот. Толщина эмалевых покрытий может достигать 1,5 – 2 мм.

Основными недостатками эмалевых покрытий являются:

- хрупкость;
- растрескивание при резких изменениях температуры;
- токсичность;
- большой объем расхода материала;

- неправильное нанесение покрытий может привести к нарушению целостности покрытия;
- требуется идеальная подготовка поверхности. [19]

Лакокрасочные покрытия: наносят на защищаемую поверхность методами:

- пневматическим распылением (применяют специализированные установки, распыляющие материал при помощи воздуха);
- распылением под высоким давлением (безвоздушное распыление) (применяют специальный насос, который подает краску к распыляющему устройству, может проводиться как с подогревом, так и без подогрева);
- аэрозольным распылением (применяют при необходимости срочной ремонтной работы. В качестве устройств применяют лакокрасочные аэрозольные баллончики, содержание ЛКМ и пропеллент (смесь фреонов), обеспечивающий давление в баллончике 0,15 – 0,35 МПа);

Большое значение имеет сушка лакокрасочных покрытий. Бывает холодная сушка (на открытом воздухе или в помещении) и горячая сушка (под воздействием высоких температур).

Основные недостатки лакокрасочных покрытий:

- невысокая стойкость к жидким средам;
- длительный срок высыхания;
- небольшая толщина однослойного покрытия;
- необходимость тщательной подготовки поверхностей;
- слабая сопротивляемость солнечному свету;
- жесткие условия к климатическим условиям нанесения и эксплуатации покрытий;
- токсичность;
- высокая стоимость;
- сложность ремонта. [20]

Способы нанесения металлических покрытий.

Диффузионный способ нанесения покрытия представляет собой процесс изменения химического состава поверхностного слоя путем проникновения в него металлов или химических элементов, обеспечивающие вместе с основой, коррозионную защиту (рис. 3).

Для нанесения диффузионных покрытий используют следующие основные методы:

- электроосаждение металла покрытия и дальнейшее прогревание до необходимо температуры;
- цементация, при ней покрытие получают путем нагрева металлического порошка;
- диффузия твердых материалов. В данном случае деталь сначала помещают во вращающуюся печь, в которой находится нагретый порошок, выдерживают в течение нескольких часов, а затем охлаждают.
- газовая диффузия. В данном случае над поверхностью металла основы, нагретой до температуры свыше 1000°C , пропускают пары металла покрытия.

Диффузионные покрытия отличаются хорошей сцепляемостью с основным металлом, большой плотностью и небольшим содержанием примесей.

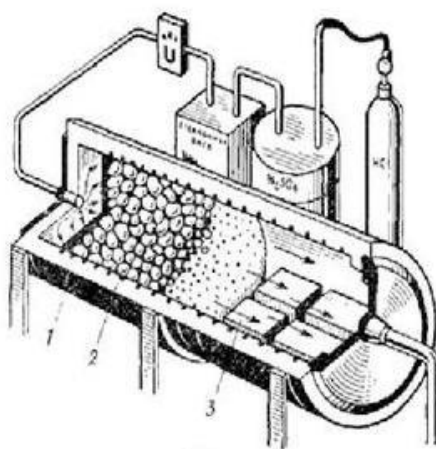


Рисунок 3 - Пример схемы процесса диффузионного покрытия: принцип нанесения диффузионного покрытия методом газового хромирования:

1 – печь, 2 – феррохром, 3 – детали. [20]

Основные недостатки диффузионных покрытий:

- невозможность изготовления диффузионных слоев из металлов на основе железа и его сплавах;
- высокая стоимость процесса формирования покрытий;
- длительность формирования диффузионных покрытий. [20]

Другим способом изготовления покрытий является плакирование. Данный метод также называют производством биметаллов. Работоспособность биметаллов определяет прочность соединения слоев, механические свойства биметалла и характеристики плакирующего слоя (например, в случае применения в агрессивных средах — его коррозионная стойкость). В данном случае основным металлом выступает, как правило, листовая конструкция из углеродистой или низколегированной стали, а плакирующий слой выполняют из листа коррозионностойкой стали.

Основные промышленные методы получения следующие (рис. 4):

- совместная пластическая деформация: литое плакирование, пакетная сварка прокаткой, автовакуумная сварка давлением;
- электродуговые методы наплавки;
- соединение металлов взрывом.

Существенными недостатками способа нанесения покрытий методами плакирования являются:

- дороговизна и трудоемкость процесса;
- возможность возникновения коррозии в местах соединения листов;
- непостоянство состава и толщины плакирующего слоя;
- необходимость правки поверхности. [20]

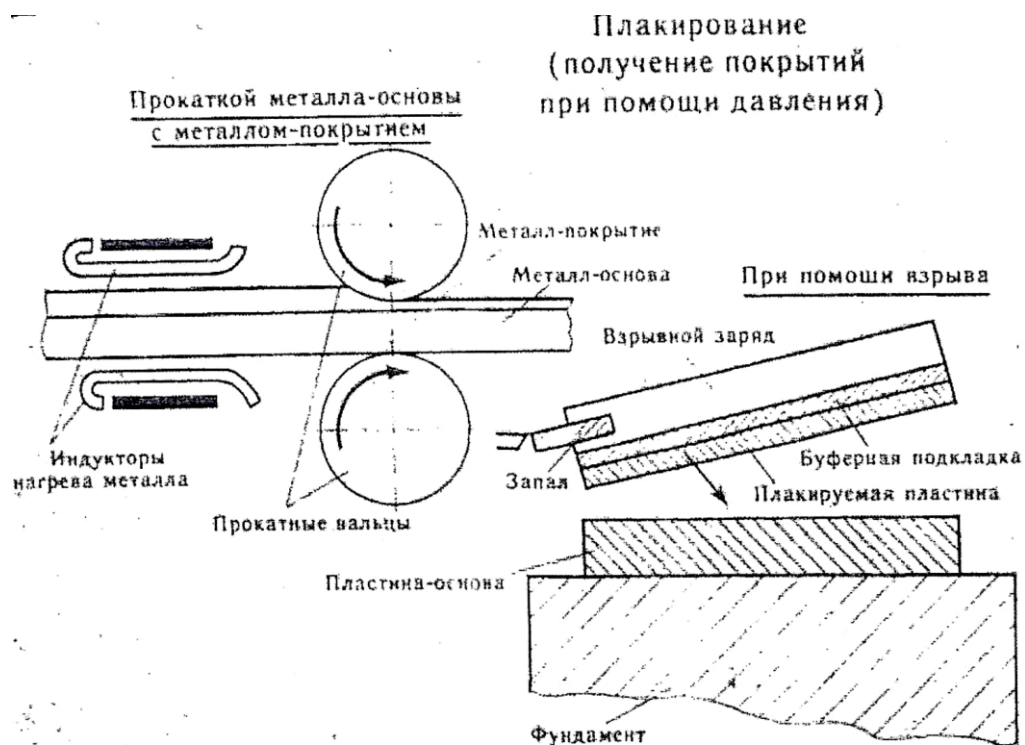


Рисунок 4 - Примеры схемы процесса плакирования покрытий: принцип плакирования методами пластической деформации и взрывом. [20]

Другим способом нанесения металлических покрытий является наплавка.

В производстве, как правило, применяется несколько основных методов наплавки:

- под слоем флюса (рис. 5): данным методом возможно получение слоев толщиной до 10 мм, с необходимыми механическими свойствами. Недостатки: перегрев изделия и высокое смешивание основного и сварочного материалов; трудность наплавки на изделия небольшим диаметром. Этот метод примени для восстановления деталей с износом более 0,6 мм; [17]

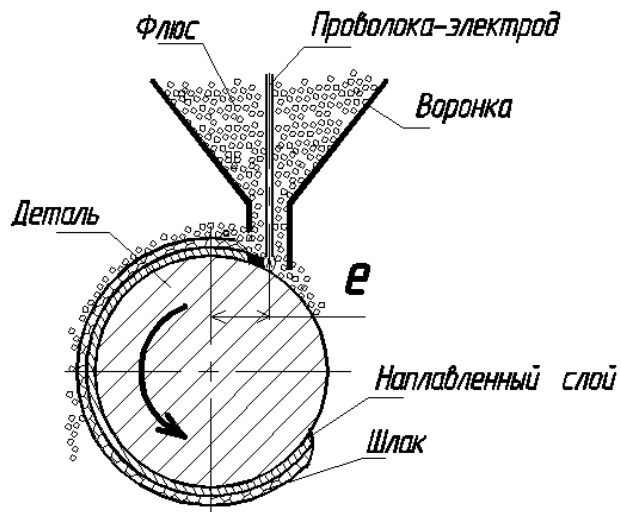


Рисунок 5 - Принцип наплавки под слоем флюса. [17]

- наплавка порошковыми проволоками: применяется для восстановления деталей с износом более 0,6 мм;
- вибродуговая наплавка (рис. 6): данный метод используется на ремонтных предприятиях, это связано с наличием наплавочных установок, простотой их освоения и эксплуатации, нанесения слоев толщиной до 3 мм на поверхности металлических деталей диаметром до 80 мм. Этот метод имеет некоторые недостатки: высокая пористость покрытий, с неравномерной твердостью и неоднородной структурой; [16].

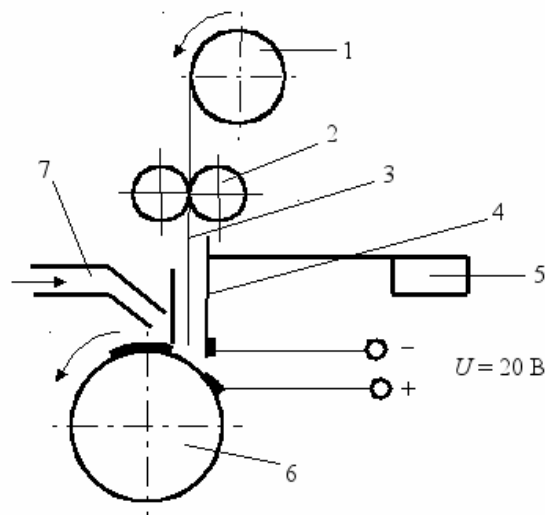


Рисунок 6 - Принцип вибродуговой наплавки:

- 1 – кассета с проволокой, 2 – механизм подачи проволоки, 3 – проволока электродная, 4 – мундштук вибродуговой наплавки, 5 – электромагнитный вибратор, 6 – деталь, 7 – патрубок с охлаждающей жидкостью. [16]

- наплавка в среде защитных газов (рис. 7): наибольшее применение имеет наплавка плавящимся электродом в среде углекислого газа. Обозначенный тип наплавки имеет ряд существенных недостатков: высокая стоимость аргона, низкая производительность для восстановления стальных деталей (применяется в основном для ремонта алюминиевых деталей), значительное разбрызгивание металла (до 15%); [17]



Рисунок 7 - Принцип наплавки в среде защитных газов. [17]

- плазменная наплавка: используется как метод восстановления изношенных поверхностей деталей, выделяют несколько видов плазменной наплавки, различающихся типом наплавочного материала, методом подачи его на восстанавливаемую поверхность и способом подключения к источнику питания. Плазменную наплавку возможно проводить единичными валиками и путем использования колебательных движений.

Наиболее распространенный способ плазменной наплавки — наплавка с вдуванием порошка в дугу. В данном случае порошок плавится и направляется на поверхность детали, под непосредственным влиянием дуги (рис. 8); [17]

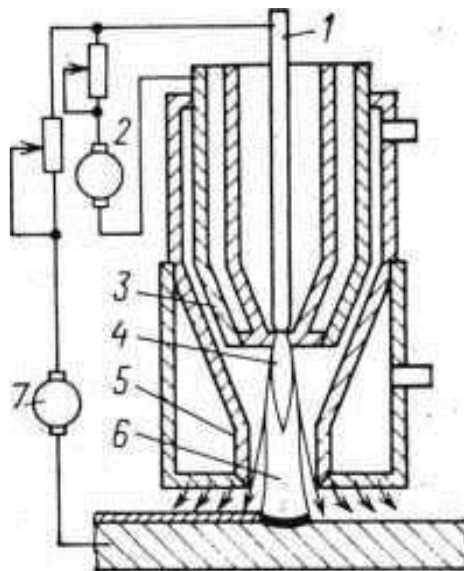


Рисунок 8 - Схема плазменной наплавки с вдуванием порошка в дугу:

1 – вольфрамовый электрод, 2 – источник питания сжатой дуги косвенного действия (плазменной струи), 3 – плазмообразующее сопло, 4 – плазменная струя, 5 – защитное сопло, 6 – сжатая дуга прямого действия, 7 – источник питания сжатой дуги прямого действия. [17]

- другим методом наплавки является наплавка проволокой, особенностью которой является то, что дуга применяется в основном для плавления проволоки, а не подогрева основного металла (рис. 9); [15]

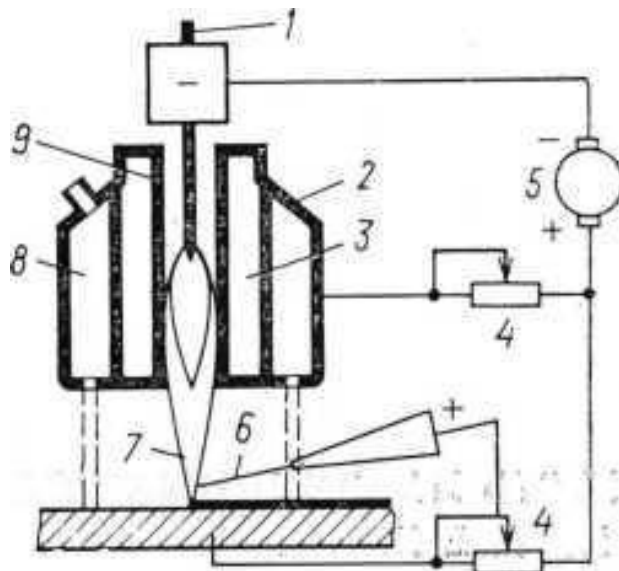


Рисунок 9 - Схема плазменной наплавки с присадочной проволокой:

1 – вольфрамовый электрод, 2 – плазмообразующее сопло, 3 – вода, 4 – балластные реостаты, 5 – источник питания, 6 – токоведущая проволока (пруток), 7 – плазменная струя, 8 – защитный газ, 9 – плазмообразующий газ. [15]

- следующим способом является плазменная наплавка с двумя плавящимися проволоками, подключенными последовательно к источнику переменного тока, с помощью которого они подогреваются и переносятся в хвостовую часть сварочной ванны, сформированной сжатой дугой прямого действия, питаемой от источника постоянного тока. Разогретый расплавленный металл предохраняют плазмообразующим газом и защитным газом, проводимым через специальное сопло. Производительность этого способа достигает 30 кг/ч (рис. 10). [15]

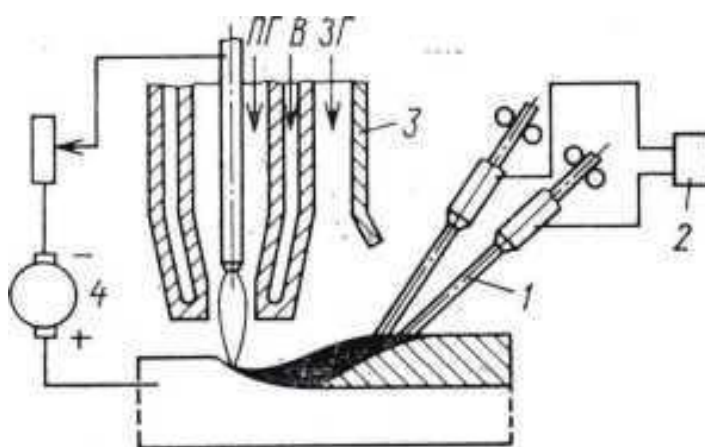


Рисунок 10 - Схема плазменной наплавки с подачей в ванну двух плавящихся проволок:

1 – электродные токоведущие проволоки, 2 – источник переменного тока, 3 – защитное сопло, 4 – источник постоянного тока, ПГ – плазмообразующий газ, В – вода, ЗГ – защитный газ. [15]

Способы плазменной наплавки широко применяются в промышленности, например наплавка порошками используется при нанесении покрытий на арматуры типа седел, задвижек, режущего инструмента, валов, лемехов, а наплавка проволоками может применяться в упрочнении поверхностей запорной арматуры, стальных поршней диаметром 60 – 100 мм, судовых трубопроводов.

Преимуществами плазменной наплавки являются:

- автоматизация процесса, что позволяет повысить производительность, качество, уменьшить потери наплавочных материалов;

- широкая возможность легирования слоев наплавки;
- возможность применения любых наплавочных металлов.

Недостатки:

- дороговизна и сложность конструкции оборудования, плазмотрона;
- низкая надежность работы оборудования;
- значительный расход газа;
- высокие требования к квалификации персонала;
- необходимость качественного охлаждения из-за высоких температурных потерь. [17]

Другим важным способом нанесения металлических покрытий является нанесение гальванических покрытий (рис. 11). Металлическую подложку после обработки отправляют во влажном состоянии в гальваническую ванну. Металлы, на которые обычно наносят гальванические покрытия должны иметь контакт с электролитом и слабое коррозионное воздействие промывочной воды, защищающей от появления окисной пленки. Правильный баланс коррозионных процессов на стадиях электроосаждения – необходимое требование формирования качественных покрытий. [21]

Большим достоинством гальванического метода по сравнению со всеми горячими методами является легкая управляемость процессом — возможность варьировать толщины и свойства металлического осадка. Существенным преимуществом является отсутствие нагрева, а следовательно и изменений структуры металла изделия и коробления в процессе получения покрытия.

Обычно процесс гальванического осаждения требует постоянного тока низкого напряжения. В качестве электролитов применяют самые разные составы: кислые, щелочные, почти нейтральные.

Многие гальванические процессы ведутся при комнатной температуре. Однако температура – важный фактор при катодном осаждении металлов и зачастую приходится им пользоваться. Различную твердость

осадков хрома можно получить изменением температуры ванны. Плотность тока значительно варьирует в разных процессах.

Время пребывания изделия в ванне тоже сильно колеблется для различных процессов и разных толщин осадков.

Гальваническое покрытие не имеет переходного слоя, оно плотнее, нежели металлизационное. Однако плотность его все же не меньше, чем горячего покрытия.

Сцепление гальванопокрытия зависит во многом от чистоты поверхности и тщательности выполнения операций, т. е. соблюдения оптимальных технологических условий.

В ряде случаев приходится прибегать к многослойным покрытиям, потому что они более качественные, особенно в плане сцепления, пористости и коррозионной стойкости. Примером могут служить декоративные и антикоррозионные покрытия хромом по железу и стали. Покрытие хрома по железу оказывается очень пористым и мало эффективным. Лучшие результаты получаются с применением трехслойного покрытия: деталь сначала омедняется, затем никелируется и, потом, хромируется.

Гальванические покрытия, как и многие другие, имеют существенные недостатки:

- пористость;
- низкая износостойкость;
- низкая долговечность;
- ухудшение механических свойств крепежных изделий из легированных сталей, вследствие наводораживания основного материала;
- продолжительный процесс нанесения покрытий;
- высокая токсичность и сложный процесс утилизации отходов. [22]

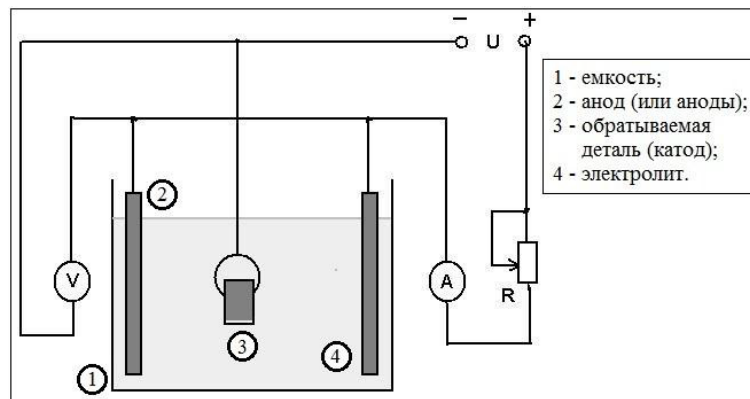


Рисунок 11 - Принцип нанесения гальванических покрытий. [22]

К газотермическим способам нанесения покрытий обычно относят газопламенное, плазменное, дуговую металлизацию, детонационное напыление, а также комбинации этих способов.

Плазменное напыление (рис. 12): применяют порошки, проволоки или прутки. Наиболее распространено напыление порошками. Принцип плазменного напыления состоит в следующем (на примере нанесения порошковых материалов): по окончании запуска воды, активации вентиляции и источника тока из баллона через пульт управления в плазмотрон подается плазмообразующий газ. Далее кнопкой «пуск» пульта управления запускают осциллятор и блок поджига, и между вольфрамовым стержнем-катодом и медным анодом плазмотрона образуется струя плазмы, предназначенную для расплавления порошка на поверхности основы, подающегося из питателя под воздействием газа. Важным фактором, определяющим прочность сцепления покрытия с основой, является температура поверхности основы изделия.

Для повышения уровня сцепления напыленных покрытий применяют метод оплавления напыленных покрытий (рис. 13). Для оплавления напыляемое покрытие следует доводить до такой температуры, при которой оплавливаемые участки приобретают блестящую поверхность. Наиболее важным критерием, влияющим на оплавление, является одинаковый прогрев основы изделия и материала покрытия. [13]

Одной из разновидностей плазменного способа нанесения покрытий является, разработанный зарубежными специалистами, метод микроплазменного напыления покрытий с использованием проволочных материалов.

Установка микроплазменного напыления включает источник питания с панелью управления, плазмотрон и специальное устройство для подачи порошка. Существует несколько особенностей данного типа напыления:

- уменьшение размера пятна напыления до 1...5 мм;
- возможность нанесения покрытий на изделия малых размеров и с тонкими стенками без локального перегрева и коробления (низкая тепловая мощность микроплазменной струи позволяет снизить нагрев основы);
- низкий уровень звука ламинарной плазменной струи (30...50 дБ).

Разработанный за рубежом тип микроплазменной установки позволяет реализовать преимущества проволочного способа газотермического напыления в условиях микроплазменной струи. С этой целью создана специализированная приставка к плазмотрону, входящая в состав установки для микроплазменного напыления (рис. 14). Приставка представляет собой компактный механизм подачи проволоки в межэлектродный участок плазменной струи. Подающий механизм имеет возможность регулировки скорости подачи проволоки путем изменения количества оборотов на валу электродвигателя. Приставка имеет малую массу и крепится на место порошкового дозатора. Конструктивной особенностью плазмотрона является выносной анод. Для стабилизации плазменной струи и защиты анода осуществляется подача защитного газа – аргона. Наличие защитной атмосферы в зоне плавления проволоки позволяет снизить степень окисления напыляемого материала, что особенно важно при напылении активных металлов таких, как вольфрам, молибден, титан, цинк, латунь.

Установлено, что при распылении проволоки в процессе микроплазменного напыления благоприятные условия создаются в результате сочетания следующих факторов: высокой удельной мощности (высокой энтальпии плазменной струи), высокой температуры плазменной струи, высокой скорости плазменной струи, использования проволок малого диаметра (0,3 мм).

Основными факторами, оказывающими влияние на процесс микроплазменного напыления с использованием проволочных материалов, являются: сила тока, расход плазмообразующего газа, диаметр проволоки и скорость ее подачи. Необходимым условием является использование проволок малого диаметра (0,2...0,4 мм) и применение повышенных скоростей подачи проволоки (5...10 м/ мин). Расход плазмообразующего газа (аргона) связан с диаметром проволоки и поверхностным натяжением расплава металла. Анализ микроструктуры покрытий показал, что микроплазменное покрытие, полученное распылением проволоки, имеет плотную структуру (с толщиной lamелей 5...30 мкм) при невысокой степени окисления материала, что связано с применением защитного газа. [23]

Методы плазменного напыления в целом, не смотря на существенные преимущества, обладают несколькими значительными недостатками:

- высокая вероятность свертывания оплавляемого покрытия из- за быстрого нагрева поверхности покрытия при недостаточном нагреве поверхности детали;
- имеет место частое нарушение слоя покрытия в результате высокой скорости истечения плазменной струи и значительного давления на напыляемую поверхность;
- применяется только для малогабаритных деталей диаметром не более 50 мм, а напыление крупногабаритных деталей, из- за неравномерности

нагрева отдельных частей, не позволяет получать качественных покрытий: образуются трещины, отслоения;

- высокая трудоемкость;
- низкая производительность процесса;
- требует применения дорогостоящих напыляемых материалов. [17]

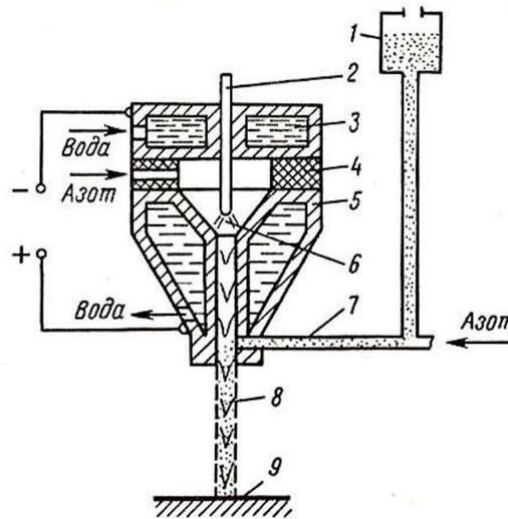


Рисунок 12 - Схема плазменного напыления (на примере порошковых материалов):

- 1 – порошок, 2 – катод, 3 – рубашка охлаждения, 4 – изоляционная прокладка, 5 – сопло (анод), 6 – дуга, 7 – трубка подачи порошка, 8 – металлоплазменная струя, 9 – напыляемая поверхность. [17]

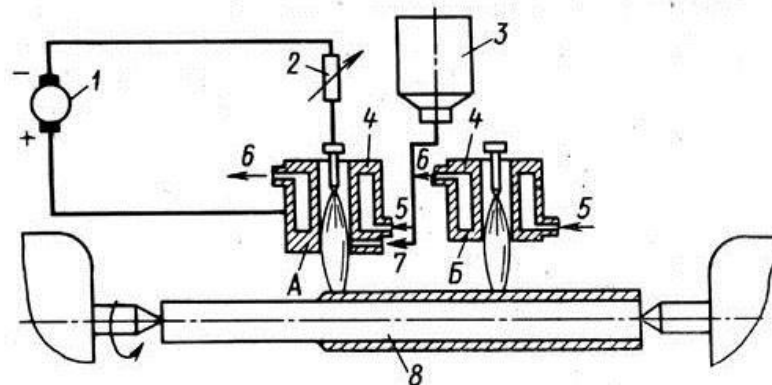


Рисунок 13 - Схема плазменного напыления с последующим оплавлением:

- 1 – источник питания, 2 – балластный реостат, 3 – питатель для подачи порошка, 4 – плазменная горелка, 5, 6 – ввод и вывод охлаждающей воды, 7 – трубопровод, 8 – рекомендуемая деталь, А – головка для напыления, Б – головка для оплавления. [17]

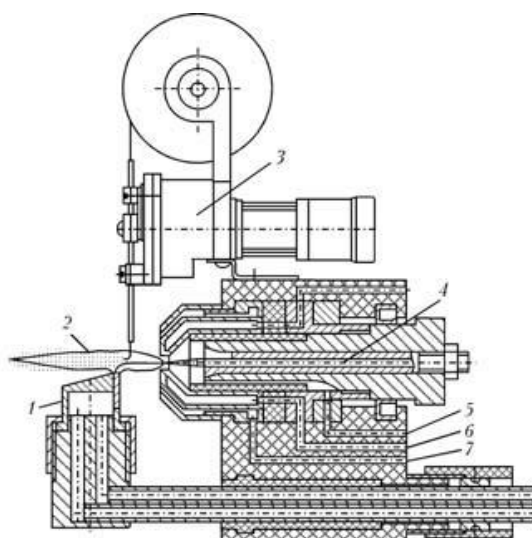


Рисунок 14 - Схема плазматрона для микроплазменного напыления проволочными материалами:

- 1 – анод, 2 – плазменная струя, 3 - механизм подачи проволоки, 4 – катод, 5 – 7 - каналы подачи соответственно плазмообразующего газа, воды и защитного газа. [23]

Газопламенное напыление (рис. 15). Данный метод основан на получении необходимой теплоты путем горения горючих газов под влиянием кислорода. В качестве наиболее распространенного горючего газа применяют ацетилен. Исходя из используемых материалов, данным способ классифицируется на два типа: наплавление проволоки, прутка и наплавление порошков. Для напыления изделие нагревают до температуры не более 100 °С. [43]

Данный метод отмечен существенными недостатками:

- процесс является трудноконтролируемым, поэтому его ведут, как правило, вручную;
- особые требования к квалификации сварщика;
- применим только для деталей небольших размеров;
- имеет место частое свертывания оплавляемого покрытия из- за разности температур поверхностей покрытия и деталей;
- высокая трудоемкость;
- низкая производительность;
- высокая стоимость напыляемых материалов. [13]

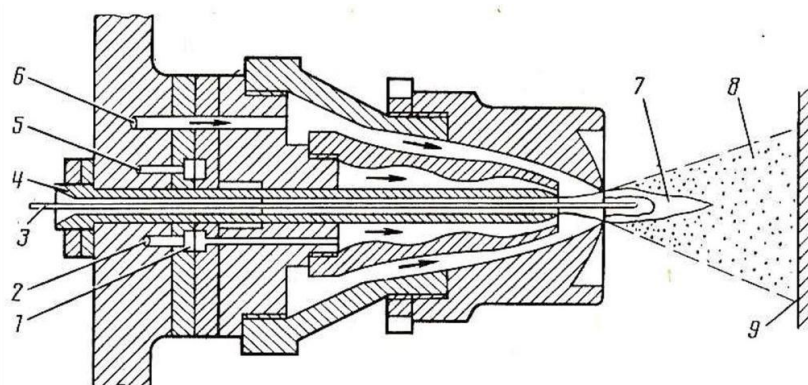


Рисунок 15 - Схема газопламенного напыления:

1 – смесительная камера, 2 – канал подачи кислорода, 3 – проволока, 4 – направляющая втулка, 5 – канал подачи ацетилена, 6 – канал подачи сжатого воздуха, 7 – ацетилено-кислородное пламя, 8 – газометаллическая струя, 9 – напыляемая поверхность. [13]

Представляет интерес применения способа детонационного нанесения покрытий. Так, иностранные специалисты предлагают, при детонационном напылении, использовать многокамерные детонационные установки (МКДУ). [24]

Данные установки были призваны решить ряд важных проблем:

- повышение эффективности взаимодействия струи продуктов сгорания и частиц порошка;
- автоматизация дозирования и увеличение точности дозирования;
- увеличение скорости и давления продуктов сгорания и, соответственно, скорости порошковой струи;
- обеспечение полной автоматизации работы устройства и высокие показатели его надежности и ремонтпригодности.

В этом устройстве (рис. 16) реализуется режим детонационного горения газовой смеси в специально спрофилированных камерах. Концентрация энергии сгорания от двух камер в цилиндрическом стволе обеспечивает формирование высокоскоростной струи продуктов сгорания, которая ускоряет и нагревает напыляемый порошок. Устройство имеет три камеры: форкамера для инициирования процесса детонации, основная цилиндрическая камера, где происходит развитие детонационного режима

сгорания, кольцевая камера со щелевым выходом в цилиндрический ствол. Кольцевая камера используется для сжатия продуктов сгорания и создания дополнительной струи, которая «подпирает» в цилиндрическом стволе продукты детонации от основной камеры. Для ускорения и нагрева в ствол подается доза порошка. Ствол может иметь внутренний диаметр 16...20 мм и длину 300...520 мм и выбирается в зависимости от свойств материала напыляемого порошка. Сужение рабочего объема цилиндрической камеры диаметром 24 мм до диаметра ствола 16 мм обеспечивает пересжатие режима детонационного горения. Последующее поджатие продуктов сгорания происходит за счет кольцевой камеры. Газодинамический процесс инициирования детонации в кольцевой камере обеспечивает схлопывание продуктов сгорания по оси ствола, что существенно повышает их скорость, давление и плотность. Перед фронтом высокоскоростных продуктов сгорания подается доза порошкового материала. Эта доза подается через кольцевую щель специального газодинамического узла подачи. Иницирование детонационного режима сгорания горючей смеси осуществляется автомобильной свечой зажигания. [44] Измерение давления в продуктах детонации и скорости волны детонации проводится с использованием пьезоэлектрических датчиков давления которые калибровались на ударной трубе. Первый датчик закрепляли на расстоянии примерно 60 мм от выхода кольцевой камеры, непосредственно на входе в ствол. Второй датчик закрепляли на выходе из ствола (длина ствола – 500 мм, диаметр – 16 мм). Расстояние между осями датчиков 525 мм. В качестве горючей смеси можно применять пропан и кислород.

Данное устройство является высокочастотным (более 20 Гц) бесклапанным, что позволяет генерировать импульсные струи продуктов сгорания, имеющие два максимума давления (3,5 и 2,0 МПа) за счет кумуляции энергии от цилиндрической и кольцевой камер сгорания. Использование двухкамерной конструкции обеспечивает повышение

скорости продуктов детонационного сгорания на 35...40 %, что, соответственно, увеличивает скорости порошкового материала. Применяемый газодинамический дозатор порошков, обеспечивает точную выдачу порции порошка перед инициированием детонации. Подтверждена высокая эффективность процесса напыления с использованием МКДУ: покрытия плотные (пористость менее 1 %), имеют высокую адгезию к основе (более 80 МПа), на формирование 1 кг материала покрытия (на примерах кермета и керамики) затрачивалось 1,0 и 2,3 м³ пропана соответственно, что в 2 раза меньше, чем в известных детонационных устройствах.

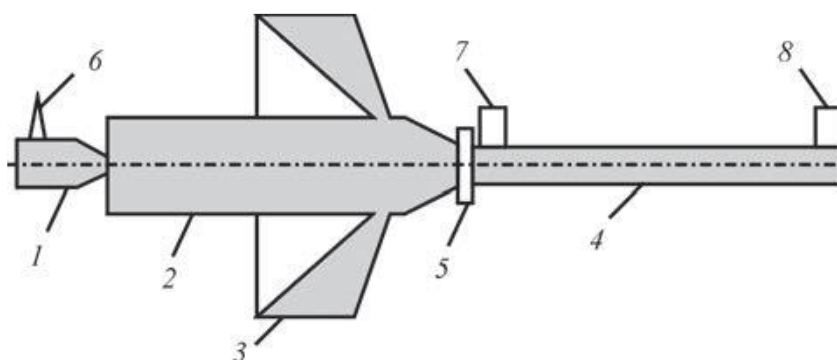


Рисунок 16 - Схема многокамерного детонационного устройства:

1 – форкамера для инициирования процесса детонации, 2 — основная цилиндрическая камера, где происходит развитие детонационного режима сгорания, 3 — кольцевая камера со щелевым выходом в цилиндрический ствол 4, 5 – специальный газодинамический узел подачи дозы порошкового материала, 6 – автомобильная свеча зажигания, 7 – первый датчик, 8 – второй датчик. [24]

Несмотря на достаточное количество положительных факторов применения, процесс применения детонационного напыления сопряжен с несколькими недостатками:

- покрытия наносятся только на материалы, не имеющие остаточных деформаций при действии взрывной волны;
- наибольшая прочность сцепления покрытия ограничивается толщиной не более 0,4 мм;
- высокий уровень шума оборудования (до 140дБ);

- более низкая производительность по сравнению с другими газотермическими способами;
- громоздкость оборудования;
- высокая стоимость оборудования;
- не применяется для напыления больших площадей поверхностей. [17]

Электродуговая металлизация (рис. 17). Сущность метода в том, что подающим механизмом одновременно из двух катушек подаются в горелку проволоки, находящиеся под напряжением, при касании которых возникает дуга. Сварочный материал расплавляется в дуге под воздействием сжатого воздуха, подающегося через сопло под давлением не менее 0,5 МПа, и при высокой скорости направляется и распыляется по напыляемой поверхности. Этот способ напыления не прихотлив в эксплуатации, характеризуется мобильностью, немалым объемом выработки. Сварочными материалами могут быть проволоки из различных углеродистых, коррозионностойких, износостойких и цветных металлов.

Электродуговой металлизацией возможно изготавливать покрытия, обладающие различными свойствами: антикоррозионными, износостойкими, жаростойкими. Высота напыленных слоев может достигать значений в несколько миллиметров. Этим методом можно наносить слои на поверхности крупногабаритных сборочных конструкций, изготовленных из различных черных и цветных металлов. [17]

Для повышения эффективности использования и ресурсов технологии, материалов имеет место применение сверхзвукового электродугового напыления, рассмотренного иностранными специалистами. [25]

Кроме того, в качестве восстановительной газовой смеси могут применяться продукты сгорания углеводородных топлив (рис. 18). По этой схеме сжигаемая в камере сгорания 5 топливно-воздушная смесь

истекает через сопло 2 в полость камеры 1, а далее через распылительное сопло 6 – в атмосферу. Струя газа, истекающая из сопла 6, распыляет жидкий металл плавящихся электродов 4, на которые через токоподводы 3 подается напряжение. Разновидность процесса, где в качестве распыляющего газа используют продукты сгорания пропано-воздушной смеси, получила название «активированная дуговая металлизация».

Данная технология является гибридной, в которой сочетается электродуговое напыление со сверхзвуковым газопламенным напылением, формированием единого сверхзвукового высокотемпературного потока газа и расплавленных частиц напыляемого материала проволок. Электрическая дуга ориентирована вдоль высокотемпературного газового потока и горит между двумя плавящимися проволоками. Такая система обеспечивает высокий уровень стабильности горения дуги, вследствие ее ориентации вдоль газового потока и, таким образом, процесса передачи тепла в электроды: интенсивный разгон и измельчение частиц расплавленного металла, их защиту от окисления в полете, снижение количества испаряемого материала (благодаря формированию двухфазового потока высокоскоростной струей продуктов сгорания). Для распыления проволок, которые плавятся электрической дугой, в указанном сверхзвуковом электродуговом металлизаторе, используется сверхзвуковая струя горячих продуктов сгорания углеводородного газа с воздухом, вытекающая из звукового сопла.

Как известно, одним из существенных недостатков покрытий, получаемых электродуговой металлизацией, является высокая степень их окисления. Этот факт чаще всего расценивается как отрицательный. Покрытия, которые формируются окисленными частицами, характеризуются также высокой пористостью и низкой прочностью сцепления покрытия с основой. Основной причиной окисления материала является его взаимодействие с кислородом в зоне электрической дуги, горящей между электродными проволоками. Способом уменьшения

влияния кислорода на расплавленный металл служит «связывание» его углеводородными газами (чаще всего метаном). Для этого в распыляемый воздух подмешивают горючие газы. Перспективность применения таких газоздушных смесей в качестве распыляющего газа можно оценить, проанализировав окисляемость материала в зоне его диспергирования. В этой зоне из-за высоких температур (6000...10000 К) происходит наиболее активное взаимодействие металла с газами. Исследования показали, что при распылении газоздушной смесью, в которой соотношение «природный газ/ воздух» = 1/8, окисляемость частиц отсутствует. Дальнейшее увеличение использования доли метана в распыляемом потоке нецелесообразно с экономической точки зрения. Другой причиной, определяющей уменьшение окисленности напыляемого материала в сверхзвуковом потоке, является снижение времени контакта расплавленных частиц с атмосферой, за счет их более высокой скорости.

Экспериментальные исследования процесса сверхзвукового напыления подтвердили существенное повышение скорости и уменьшение размера частиц напыляемого материала проволок, уменьшение размера пятна напыления, а также значительное понижение окисления напыляемого материала. Для проведения исследования электродуговой металлизатор оснастили специальными соплами для формирования воздушного потока, который обеспечивает сжатие распыляемой струи, повышение ее скорости и уменьшение окисления материала.

Улучшение практически всех параметров сверхзвукового электродугового напыления объясняется уменьшением (в случае применения такой технологии) массы жидкого металла, образуемого на торце проволоки и, соответственно, уменьшения размеров частиц напыляемого материала. Повышение дисперсности частиц напыляемого материала приводит к увеличению их скорости и динамического взаимодействия с основой, уменьшению пористости покрытия, уменьшению размеров напыленных ламелей и, соответственно,

увеличению скорости охлаждения расплавленных частиц на основе и увеличению количества быстрозакаленных метастабильных структур в покрытии.

Повышение температуры распыляемых частиц и увеличение их дисперсности очень важно именно при напылении со сверхзвуковыми скоростями истечения струи, так как в этом случае существенно снижается время пребывания расплавленной капли на торце проволок в высокотемпературной зоне электродугового участка. Также при этом достигается создание прочных металлургических связей между напыляемыми частицами и металлической основой. [45]

Не смотря на ряд важных положительных характеристик в целом, все же, необходимо указать на несколько общих основных недостатков процесса электродуговой металлизации:

- повышенное окисление металла;
- выгорание легирующих элементов (хотя если применять для напыления проволоки с избытком легирующих элементов, например Св-07Х25Н13, то происходит компенсация их потери при выгорании). [17]

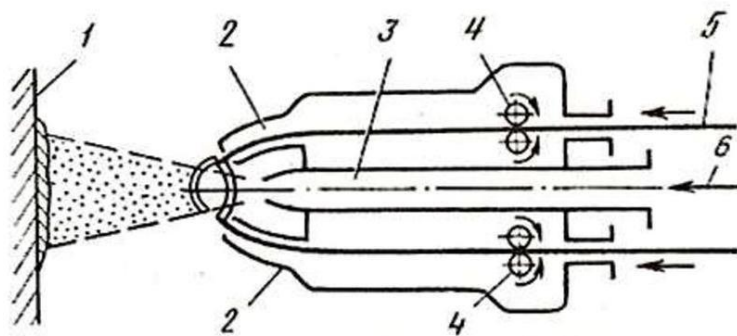


Рисунок 17 - Схема нанесения покрытий электродуговой металлизацией:

- 1 – напыляемая поверхность, 2 – направляющие наконечники, 3 – воздушное сопло, 4 – механизм подачи проволоки, 5 – проволока, 6 – сжатый воздух. [17]

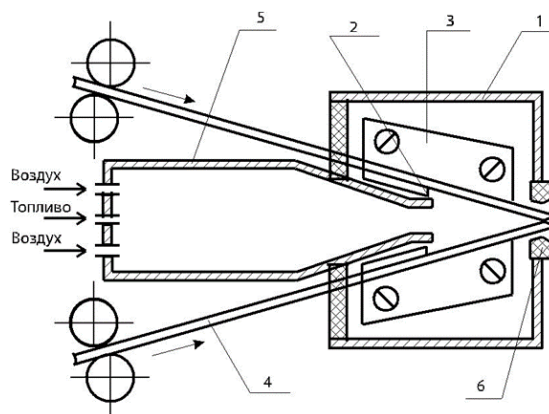


Рисунок 18 - Схема использования в дуговом металлизационном аппарате камеры сгорания.

Некоторые зарубежные источники сообщают о широком применении способа нанесения покрытий методом лазерного холодного напыления. [11] Он имеет несколько существенных преимуществ: позволяет наносить твердотельные плотные, однородные и беспористые покрытия на различные основы, а также обладает высокой скоростью формирования покрытий при небольших эксплуатационных нагрузках без использования дорогостоящего нагрева и технологических инертных газов. Процесс лазерного холодного распыления (LACS) - это относительно новое направление в области лазерной обработки материалов, которое используется для модификации поверхности и нанесения покрытий с целью повышения их функциональности. Он также может представлять собой гибридный метод нанесения покрытий, который сочетает в себе преимущества, как холодного напыления (CS), так и лазерного размягчения. [46]

Метод лазерного холодного распыления (LACS) позволяет применять широкий спектр материалов, которые могут быть нанесены с использованием азота, и устранить необходимость в газовом нагреве. Данный метод расширяет и дополняет спектр применения способов термического распыления.

Лазер позволяет нагревать как частицы, так и основу до температуры плавления частиц, тем самым значительно снижая

прочность частиц (на 30...80%), и позволяя частицам деформироваться и формировать покрытие с необходимой скоростью.

На основе расположения лазерного луча, пистолета холодного распыления и времени, в течение которого лазерное излучение наносится, на нанесенные холодным распылением покрытия, определяются три варианта применения LACS (рис. 19), как:

- метод предварительной обработки лазерным лучом поверхности основы, в течение долей секунды, до появления струи при холодном распылении, что позволяет размягчать место осаждения и, таким образом, распыленные частицы плотно прижимаются к основе, образуя крепкое сцепление покрытия;
- связь процесса холодного распыления с лазерным лучом для обработки как основы, так и газодинамических частиц, т.е. происходит уменьшение прочности частицы и размягчение места осаждения, таким образом, позволяя частицам деформироваться и формировать покрытие с необходимой скоростью удара частиц;
- конечная обработка лазером, для устранения микромасштабной пористости внутри осадка покрытия, путем поверхностного переплава (так называемое глазурирование покрытия).

В качестве материалов данного покрытия, как правило, применяются алюминий, никель, хром, титан, кобальт, а также их сплавы и композиты. Наиболее широко применение данного метода в химической, нефтехимической, энергетической и медицинской промышленности.

Согласно проведенного анализа некоторых зарубежных специалистов, существенными недостатками данного метода нанесения покрытий являются:

- высокая вероятность появления пор в покрытии, при последующей обработке лазером (за счет повышения внутреннего напряжения в местах упрочнения покрытия), а также в виду присутствия остаточных

неметаллических включений и остаточной влажности наплавочного порошка;

- дороговизна процесса;
- требуется тщательная предварительная обработка поверхности;
- сцепляемость покрытия с основой значительно уступает другим, более простым в эксплуатации методам нанесения покрытий, например электродуговой металлизации;
- весьма распространено наличие несплошностей в покрытиях (микропористость);
- применяется, главным образом, в основном для нанесения тонких слоев;
- не применим для нанесения защитных покрытий на крупногабаритные, например сборочные поверхности. [26]

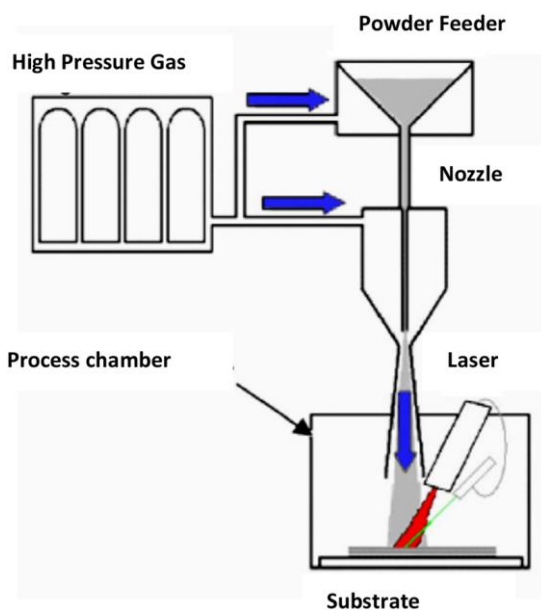


Рисунок 19 - Схема лазерного холодного распыления (LACS). [11]

Все вышперечисленные методы обуславливают возможность формирования методами газотермического напыления рабочих поверхностей для деталей узлов трения, работающих в очень широком диапазоне нагрузок и скоростей. В условиях АО «Сызранского нефтеперерабатывающего завода» используются следующие методы

газотермического напыления: плазменное напыление, газопламенное напыление, активированная дуговая металлизация.

1.3.2. Разновидности материалов антикоррозионных покрытий

При выборе материалов покрытий необходимо учитывать их коррозионную стойкость в конкретных условиях эксплуатации изделий, технологические свойства, экономическую эффективность.

Предлагается к рассмотрению, наиболее часто применяемые в промышленности, антикоррозионные неметаллические и металлические материалы. [47]

Неметаллические материалы.

Лакокрасочные материалы.

Лакокрасочные материалы делят на группы (табл. 3), их также классифицируют по назначению (табл. 4).

Лакокрасочные материалы маркируются следующим образом. В конце слов « эмаль», « лак», « грунтовка» и т.п. проставляются две буквы, обозначающее пленкообразующее вещество (табл. 3).

Также применяются маркировка, обозначающая тип ЛКМ: «П – краска порошковая, В – краска водоразбавляемая, Э – краска вододисперсионная, Б – лак, не содержащий активного растворителя». [27]

Таблица 3 - Классификация лакокрасочных материалов. [27]

Группа	Условное обозначение	Группа	Условное обозначение
Глифталевые	ГФ	Сополимерно-акриловые	АС
Пентафталевые	ПФ	Нитроцеллюлозные	НЦ
Меламинные	МЛ	Этилцеллюлозные	ЭЦ
Мочевинные	МЛ	Перхлорвиниловые	ХВ
Фенольные	ФЛ	Фторопластовые	ФП
Фенолоалкидные	ФА	Поливинилацетатные	ВА
Эпоксидные	ЭП	Кремнийорганические	КО
Алкидно- и масляно-стирольные	МС	Полиамидные	АД
Полиэфирные ненасыщенные	ПЭ	Поливинилацетальные	ВЛ
Полиуретановые	УР	Битумные	БТ
Полиакриловые	АК	Канифольные	КФ
		Масляные	МА

После буквенного обозначения через черточку проставляется цифровой индекс. Первая цифра обозначает применение лакокрасочного материала (табл. 4). Далее проставляется цифра или число, относящееся к тому или иному ЛКМ. [27]

Таблица 4 Обозначения групп лакокрасочных материалов. [27]

Группа лакокрасочных материалов	Обозначение	Условия эксплуатации
Атмосферостойкие	1	Стойкие к атмосферным воздействиям в различных климатических условиях, эксплуатируются на открытых площадках
Ограниченно атмосферостойкие	2	Стойкие при эксплуатации под навесом и внутри помещений
Водостойкие	4	Стойкие к воздействию пресной и морской воды
Специальные	5	Стойкие к рентгеновским излучениям, светящиеся, терморегулирующие, используются для пропитки тканей, окраски кожи, резины, пластмасс
Маслобензостойкие	6	Стойкие к воздействию минеральных масел, керосина, бензина
Химически стойкие	7	Стойкие к воздействию кислот, щелочей и др. жидких химических веществ и их паров
Термостойкие	8	Стойкие к воздействию повышенных температур (от 60 до 500 °С)

Продолжение таблицы 4

Группа лакокрасочных материалов	Обозначение	Условия эксплуатации
Электроизоляционные	9	Эксплуатируются в условиях воздействия электрических напряжений, электрической дуги и поверхностных разрядов
Грунтовки	0	Применяются при подготовке поверхности для нанесения лака или краски
Шпатлевки	00	Предназначены для устранения дефектов поверхности, в том числе неровностей, трещин и т.п.

Основные свойства лакокрасочных материалов следующие:

- алкидные (глифталевые и пентафталевые): отличаются неплохим декоративным видом и адгезией; стойки к воздействию нефтепродуктов; применяют для защиты от коррозии изделий, эксплуатирующихся в атмосфере умеренного климата и поверхностей изделий, находящихся внутри помещений. В качестве материалов данной группы применяют грунтовки, шпатлевки, эмали, которые получили распространение при защите поверхностей оборудования, например, в машино- и автомобилестроении;
- алкидностирольные: отличаются хорошей адгезией с металлическими поверхностями; достаточно прочны, тверды, устойчивы к воздействию бензина, щелочи, минеральных масел; защитные свойства повышаются после сушки при повышенной температуре, а также если поверхности предварительно загрунтованы; обладают меньшей коррозионной стойкостью в атмосферных условиях по сравнению с алкидными материалами. В данную группу входят различные грунтовки, шпатлевки, эмали, применяющиеся в автомобилестроении, медицине, обрабатывающем производстве;
- меламино- и мочевиноалкидные: достаточно эластичны; обладают высокими защитными и декоративными свойствами; имеют невысокую адгезию с основным материалом, поэтому эти материалы применяют на

предварительно загрунтованные поверхности. В эту группу входят, в основном, широкий выбор эмалей, которые могут быть применимы в двигателе-, приборо-, автомобилестроении;

- фенольные: обладают высокими водо- и атмосферостойкостью, механической прочностью, адгезией к металлу; отличаются высокими антикоррозионными свойствами, устойчивы к действию высоких температур и влажности воздуха, а также к кислотам, бензину и маслам. К этой группе материалов, в основном, относят грунтовки, которые используются в качестве подготовки деревянных, металлических поверхностей из черных и цветных металлов;

- водоразбавляемые: данные материалы получают из водорастворимых смол (акриловые, алкидные, эпоксидные и др.); обладают идентичными с алкидными, фенольными и меламино- и мочевиноалкидными защитными свойствами. Используют грунтовки, эмали, шпатлевки для защиты металлических поверхностей из черных и цветных металлов;

- эпоксидные и эпоксиэфирные: образуют пленки и отличаются стойкостью к воде, кислотам, щелочам, маслам; обладают хорошей адгезией и электроизоляционными свойствами; улучшение адгезии, повышение твердости, водостойкости и понижение паропроницаемости достигается путем повышения температуры данных материалов до 100 – 110 °С. Применяют грунтовки, шпатлевки, эмали, в основном для покрытия металлических поверхностей из различных металлов и сплавов во всех сферах производства;

- полиуретановые: характеризуются достаточно хорошей твердостью, стойкостью в водной среде, стойкостью к воздействию кислот, бензина, керосина, атмосферы, промышленных газов, пыли, имеют высокие декоративные качества. Здесь характерно применение различных лаков, для покрытия черных и цветных металлов;

- кремнийорганические: обладают высокой термостойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами в водной среде, стойкие к маслам,

бензину, растворам солей, слабым кислотам и щелочам; уступают по адгезии и прочности алкидным, эпоксидным материалам. Данная группа характеризуется тем, что при защите поверхностей применяют, в основном, эмали для покрытия металла, который, в процессе эксплуатации, не будет разогреваться до температуры от 230 °С до 500 °С;

- перхлорвиниловые: обладают хорошей стойкостью против воздействия атмосферы; хорошая адгезия с основным металлом достигается путем нанесения их на грунтовки, изготовленные на основе акриловых, феноломасляных и алкидных смол. Используют грунтовки, шпатлевки, эмали в станкостроении, при производстве железнодорожного оборудования, в сельском хозяйстве;
- материалы на основе сополимеров винилхлорида: отличаются хорошей эластичностью, прочностью, лучшей, по сравнению с перхлорвиниловыми материалами, адгезией. Материалы этой группы характеризуются применением эмалей и лаков при производстве железнодорожных вагонов, мостов, цистерн и др. подобных конструкций;
- полиакриловые и алкидноакриловые: обладают хорошей стойкостью к воздействию света, атмосферы, водной среды, бензина, смазочных масел; имеют хорошую механическую прочность и блеск. Применяются грунтовки, эмали, лаки для покрытия кузовов автомобилей, мотоциклов, приборов медицинского, спасательного оборудования, поверхностей бытовой техники, также широко применяются для защиты алюминиевых поверхностей;
- нитроцеллюлозные: отличаются хорошим блеском, твердостью, бензостойкостью, атмосферостойкостью; неплохая адгезия возникает при смешении данных материалов с твердыми смолами. К данной группе относится, в основном, применение эмалей и лаков металлических поверхностей из стали и чугуна, а также деревянных поверхностей;
- поливинилацетальные: обладают неплохой сцепляемостью с углеродистыми сталями, содержащими железо, и металлами из цветных

сплавов; имеют высокую коррозионную стойкость против влияния больших и малых температур, различных видов топлива, минералов, горячей воды, пара. Характерно применение грунтовок, эмалей и лаков при производстве изделий из черных и цветных металлов, в том числе, различных емкостей для воды, бензина, керосина, масел, дизельного топлива;

- безмасляные битумные: обладают высокой стойкостью к водной среде, но нестойкие к солнечному свету; применяются для защиты металла в условиях высокой влажности; смешивание данных материалов с алюминиевой пудрой улучшает атмосферостойкость материалов.

Применяется, в основном, большой выбор лаков для покрытия деталей металлических поверхностей из сталей и магниевых сплавов;

- маслянолаковые: отличаются твердостью, хорошо шлифуются; слабоустойчивые к воздействию атмосферы; применяются для отделки изделий и деталей внутри помещений. Данной группе соответствует использование лаков, как материала для покрытия металлических поверхностей из черных и цветных металлов и сплавов;

- грунтовки: значительно влияют на прочность, долговечность покрытий; бывают ингибиторные (т.е. в состав входят такие пигменты, как сажа, свинцовый и железный сурик, цинковые белила, которые вместе со связующими веществами образуют соединения, замедляющие процесс коррозии), пассивирующие (содержат цинковый и стронциевый кроны, хромат калия, соли хромовой кислоты, которые способствуют образованию на защищаемой поверхности пассивирующей пленки, повышающей его коррозионную стойкость), фосфатирующие (содержат ортофосфорную кислоту, благодаря которой на поверхности металлов образуется тонкий слой фосфатов, который, после нанесения на него эмали или лака, защищает от атмосферной коррозии), протекторные (содержат порошки цинка, алюминия, магния, которые обладают хорошим потенциалом, например по сравнению с железом, и, под воздействием

агрессивной среды будут разрушаться, защищая поверхности стальных изделий). [28]

Обзор лакокрасочных материалов показал, что они достаточно широко и разнообразно применяются в качестве защитных во многих отраслях промышленности, сельского хозяйства, производстве медицинского оборудования, строительстве, изготовлении железнодорожных конструкций и оборудования, а также с целью придания декоративных свойств. В тоже время многие авторы сходятся во мнении, что лакокрасочные материалы обладают многими недостатками:

- недостаточная адгезия по сравнению с неорганическими (металлическими) материалами;
- слабая стойкость к солнечному свету;
- снижение защитных функций при воздействии или перепаде температур;
- высокая токсичность;
- требуется предварительная подготовка поверхности (как правило, грунтованием);
- невысокая стойкость к атмосферным условиям;
- горючесть;
- сложность ремонта;
- высокие затраты.

Полимерные и гуммировочные материалы.

Различают термопластичные (термопласты) и терморезистивные (реактопласты) полимеры. Термопластичные полимеры при нагревании становятся мягкими и снова затвердевают при охлаждении, сохраняя свои первоначальные свойства. Терморезистивные полимеры при нагревании необратимо изменяют свои свойства и переходят в неплавкое и нерастворимое состояние.

Выбор полимерных материалов зависит от их химической стойкости (табл. 5). [29]

Таблица 5 - Химическая стойкость полимерных материалов в различных средах. [29]

Полимер	Вода и растворы солей	Основания		Кислоты		Окислители	Бензин, масла, жидкое топливо	Углеводороды		Галогенуглеводороды	Кетоны	Эфиры		Спирты
		слабые	сильные	слабые	сильные			алифатические	ароматические			простые	слабые	
Термопласты														
Полиэтилен														
высокого давления	В*	В	В	В	С	С	Н	О	О	Н	Н	О	О	О
низкого давления	В	В	В	В	С	С	О-С	О	О	Н	Н	С	Н-В	Н
Полипропилен	В	В	В	В	С	В/С	О-Н	В/О	Н	Н	В	О	О	О
Поливинилхлорид														
винипласт	В	В	В	В	В	С	В	В	Н	Н	Н	В	Н	О
пластикат	В	В	О	В	Н	Н	Н-Н	Н	Н	Н	Н	О	Н	В
Поливинилиденхлорид	В	В	-	В	-	-	В	В	В	-	Н	-	В	В
Политетрафторэтилен	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В
Политрифторхлорэтилен	В	В	В	В	В	В	С	В-С	С	О	В	Н	Н	В
Полиформальдегид	В	В	В-С	Н	Н	С	В	В	С	В-С	О	В	Н	-
Пентапласт	В	В	В-Н	В	В	Н	В	В	В	В-О	В	В	В	-
Реактопласты														
Фенолоформальдегидные	В	С	Н	С	Н	О	В-С	В	С	С	В	С	С	-
Фаолит	В	С	Н	В	В	Н	В	В	В	В	-	-	-	-
Фурановые	В	В	В	В	В	С-Н	В	В	В	В	В	В	В	-
Кремнийорганические	В	Н	Н	В	Н	О	О	Н	Н	Н	В	Н	Н	-
Полиэфирные	В-С	Н	Н	О	О	О-Н	В	В	Н	С-О	Н	О	О	-

Продолжение таблицы 5

Полимер	Вода и растворы солей	Основания		Кислоты		Окислители	Бензин, масла, жидкое топливо	Углеводороды		Галогенуглеводороды	Кетоны	Эфиры		Спирты
		слабые	сильные	слабые	сильные			алифатические	ароматические			простые	слабые	
Полиуретановые	В	В	Н	О	Н	О-Н	В	В	В	О	Н	В	С	-
Эпоксидные	В	В	О-В	В	С	Н	В	В	В	О-С	О	В	О	-

* В – вполне стойкие, С – стойкие, О – относительно стойкие, Н – нестойкие

Полимерные материалы применяются в основном для антикоррозионной защиты металлических поверхностей, эксплуатируемых в воздушных средах сильной и средней агрессивности.

Для антикоррозионной защиты в промышленности применяются следующие основные полимерные материалы:

- полиэтилен: отличается высокой стойкостью к воздействию воды и агрессивных сред при температуре до 60 °С, кислотам, щелочам, окислителям и растворителям; слабо воздействуют на полиэтилен жиры, масла, керосин и другие нефтяные углеводороды, а также фосфорная, соляная и фтористоводородная кислоты, но, при этом, серная и азотная кислоты разрушают его при температурах выше 60 °С; прочностные и адгезионные свойства полиэтилена повышаются при наполнении его оксидами алюминия, хрома, кварца, талька, диоксидами титана. Применяют этот материал в виде: порошков для защиты трубопроводов, вентиляторов, химической аппаратуры, арматуры, пленок для защиты стальных подземных трубопроводов, строительных конструкций и изготовления металлопласта, листов толщиной 1-6 мм для футеровки емкостей с агрессивными жидкостями; [30]

- полиизобутилен: обладает значительной химической стойкостью к кислотам, щелочам, растворам солей и воде, спиртам, эфирам, кетонам,

но, при этом, не стоек к маслам, жирам и солнечным лучам в присутствии кислорода воздуха. Применяют его в виде листов (по внешнему виду напоминает резину) и пленок;

- полипропилен: имеет высокую температуру плавления (до 170 °С), стоек к старению, влиянию воды, неокислительных кислот, щелочей и растворов солей, при этом, азотная кислота разрушает его при высоких температурах; не растворяется в органических растворителях, но при температуре выше 80 °С растворяется в ароматических и хлорированных углеводородах. Применяется в виде: листов толщиной 1-2,5 мм для облицовки емкостей с агрессивными жидкостями, пленок для гидро-, паро- и газоизоляции оборудования, порошков для противодействия влиянию коррозии, возникающей из-за высоких температур;

- поливинилхлорид: бывает двух видов – жесткий (винипласт) и мягкий (пластикат); винипласт имеет значительную стойкость к действию кислот, щелочей, спиртов, масел, бензина, а пластикат к действию воды, щелочей, но под действием минеральных масел и органических растворителей становится хрупким. Применяется в виде пленки, а также в качестве порошков, паст для предохранения поверхностей труб и других цилиндрических изделий;

- фторопласты: характеризуются коррозионной стойкостью против влияния химических элементов, факторов атмосферных условий, тепло- и морозостойкостью; подразделяются на: политетрафторэтилен (превосходит по химической стойкости все синтетические полимеры, благородные металлы, специальные сплавы, керамику; применяются в виде порошков для защиты химической аппаратуры, стальных труб, фитингов), политрифторэтилен (обладает высокой теплостойкостью и применяется в виде порошков для защиты контейнеров хранения аккумуляторной серной кислоты), поливинилфторид (имеет значительную прочность, стойкость к атмосферным воздействиям, хорошую адгезию; применяется в виде пленки в химической промышленности для защиты стен зданий и

сооружений), поливинилиденфторид (имеет высокие механические свойства; применяется для облицовки трубопроводов, вентилях, насосов, емкостей, работающих в сильноагрессивных средах); [30]

- пентапласт: обладает стойкостью к кислотам, щелочам, органическим растворителям; применяется в виде листов для футеровки труб, емкостей и аппаратуры. [12]

Гуммировочные материалы обладают повышенной защитой при влиянии различных жидких химических веществ, за исключением азотной, хромовой и серной кислот; подразделяются на синтетические каучуки (изопреновый, хлорпреновый, бутадиеновый и бутадиенстирольный каучуки) и жидкие каучуки (именуются также наиритами, изготовленными на основе хлорпренового в виде смеси из 76% сольвент-нафты, 19% скипидара и 5% н-бутилового спирта). Применяются в виде листов, растворов и паст для защиты от коррозии изделий всех сфер производства, включая детали сложной конфигурации. [12].

Данный обзор о полимерных и гуммировочных материалах, представленный из различных источников информации, сообщает, что эти вещества, применяемые в качестве защиты от воздействия коррозии, имеют немало необходимых свойств: плотность, значительные механические и гидроизоляционные свойства, высокая химическая теплостойкость, хорошие адгезионные, герметизирующие, звукоизолирующие и другие свойства. Помимо явных положительных сторон применения данных материалов в качестве защитных покрытий от коррозии, они обладают значительными недостатками:

- старение под воздействием высоких температур, продолжительного влияния агрессивных сред, что приводит к уменьшению эластичности, увеличению жесткости и хрупкости материалов;
- значительно низкая сцепляемость покрытия, по сравнению с металлическими;
- горючесть;

- токсичность;
- деформируются под воздействием нагрузок;
- значительная вероятность трещинообразования;
- невысокая стойкость к атмосферной коррозии;
- ограниченность в применении (в основном на поверхностях деталей небольших размеров);
- негативное влияние на окружающую среду.

Металлические материалы.

Выбор металлического материала для антикоррозионной защиты зависит от стоимости, механических и декоративных свойств материала.

На стоимость материала влияет технология его нанесения. Металлы, применяемые для покрытий, по стоимости можно подразделить на три класса: самой низкой стоимости – цинк (Zn), железо (Fe), свинец (Pb), промежуточная – никель (Ni), олово (Sn), кадмий (Cd), алюминий (Al), дорогостоящий металлов – серебро (Ag), палладий (Pd), золото (Au), родий (Rh).

Механические свойства имеют большое значение в случаях, если на поверхности детали оказывают влияние элементы агрессивной среды (высокие температуры, износ, химические жидкости и вещества). Наиболее механически устойчивыми являются материалы – Ni и хром (Cr), наименее – медь (Cu), Zn, Ag, относительно устойчивыми – Pb, Sn, Au, индий (In).

Декоративными свойствами металлов являются: цвет, яркость, внешний вид. Можно получить различные цвета металлов: светло-голубой хромовый, желтый латунный, золотистый, красный бронзовый. Неплохим блеском обладают покрытия Cu, Cd, Ni, Ag, Au.

Металлические покрытия наносятся, в основном, на углеродистые стали, следовательно, защитные покрытия, наносимые на стальные поверхности, возможно разделить на два класса: анодные, имеющие отрицательный потенциал, – Cr, Zn, Al, марганец (Mn) и катодные (с

более положительным потенциалом) – платина (Pt), Au, Ag, Cu, Sn, Ni, Cd.

Анодные покрытия обеспечивают протекторную защиту стали. Под воздействием элементов агрессивной среды они повреждаются, и их защитные функции уменьшаются.

Катодные покрытия механически преграждают доступ агрессивной среды к поверхности основного металла.

В качестве защитных, в промышленности наиболее распространено применение таких металлических материалов, как: Zn, Al, Cd, Cr, Ni, Cu, Sn, Pb и их сплавы. [31] Большой интерес представляет влияние на металлические материалы элементов атмосферной коррозии. В данном случае коррозия металлов усиливается из-за присутствия в атмосфере городов и промышленных зон серосодержащих соединений: сернистого и серного ангидридов и сероводорода. Помимо этого, в присутствии влаги, образуются кислоты, разрушающие имеющиеся на металлах естественные защитные пленки и ускоряют коррозию. В воздушной среде, свободной от серосодержащих соединений, ввиду влияния кислорода и углекислого газа на поверхности металла возникают основные соли и коррозия приостанавливается. Углекислый газ в этом случае не агрессивен, а действует как защитное средство.

Металлы, по воздействию атмосферной коррозии, делятся на три группы (рис. 21):

- группа хрома (алюминий и сплавы, содержание хром). Здесь характерно фактически полное прекращение коррозии за короткое время;
- группа меди (медь, свинец). У данных металлов после значительной начальной коррозии возникает толстый защитный слой. Рост пленки на этих металлах подчиняется параболическому закону;
- группа цинка (цинк, магний, кадмий, никель). Защитные слои из данных металлов легко разрушаются и происходит сильная коррозия. Окисление этих металлов подчиняется линейному закону (рис. 22). [32]

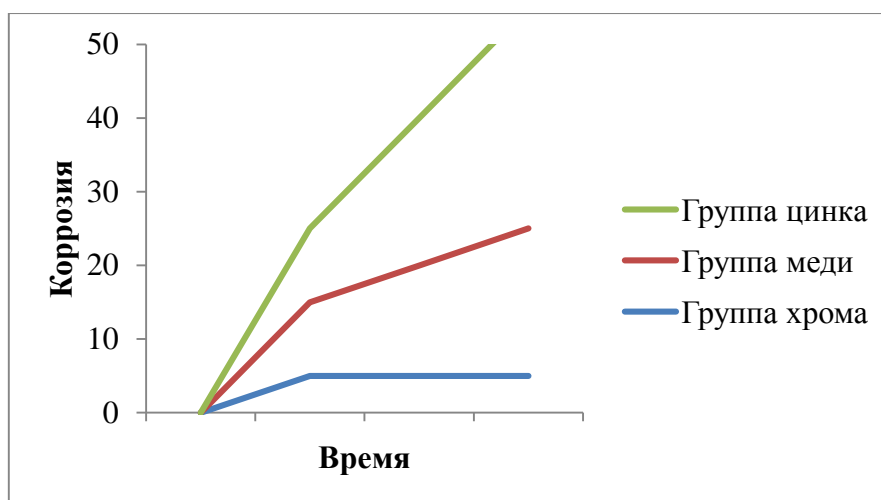


Рисунок 21 - Зависимость влияния времени и атмосферной коррозии различных классов металла. [32]

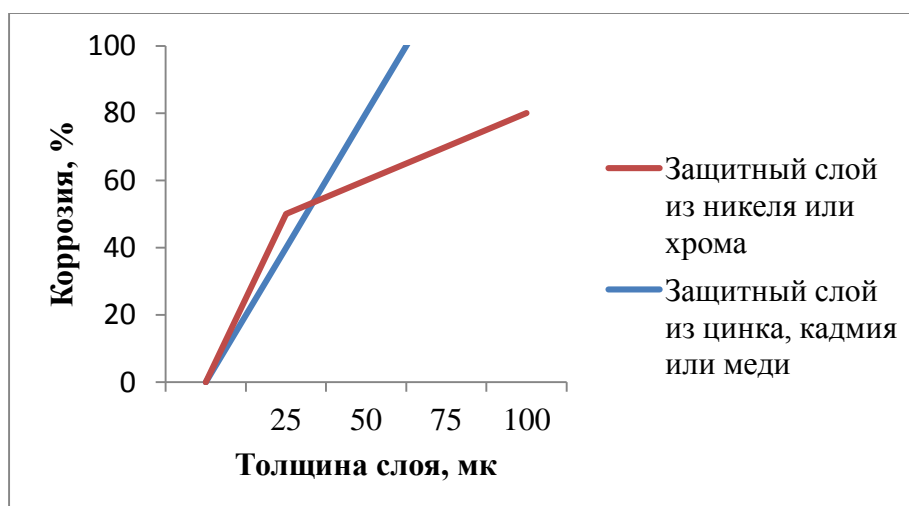


Рисунок 22 - Влияние толщины покрытия из цинка, кадмия, меди, никеля или хрома на уровень коррозии в течение года. [32]

Информация о коррозионной стойкости металлических материалов в среде влияния элементов атмосферных условий представлена в таблице 6. [32]

Таблица 6 - Стойкость к коррозии металлических материалов под влиянием элементов атмосферных условиях. [32]

Атмосферные условия	Скорость коррозии, мк/ год						
	Fe	Zn	Pb	Cu	Ni	Mg	Al
Сельская	4 – 60	1 – 3,4	1,4	1,9	1,1	-	0,2 – 0,7
Городская	30 – 70	2,8 – 6	2	2,9	2,4	13 – 20	0,5 – 2
Промышленная	40 - 160	3,8 – 19,3	3,7	4,0	5,8	29	3 – 5,5
Морская	60 – 170	2,4 – 15,3	1,8	3,8	2,8	-	2 – 15,5
Тропическая	0,8 - 73	0,4 – 1,2	-	-	-	-	0,4 – 1

Необходимо отметить, что металлические покрытия не только защищают основной металл, но и позволяют экономить ценные металлы. Поэтому необязательно изготавливать изделие из ценного металла, достаточно, чтобы только его поверхность имела свойства ценного металла. Данные, по некоторым основным металлам, приведенные в таблице 7, хорошо определяют экономическую выгоду. [32]

Таблица 7 - Расход металла при изготовлении из него изделия и при нанесении покрытия (объем детали 8000 см³, поверхность 0,28 м²). [32]

Металл	Расход металла, кг					
	При изготовлении детали		При нанесении покрытия			
	Из металла	Из 20 %-го расплава	0,25 мм (плакирование)	0,05 мм (горячее покрытие)	0,02 мм (гальвано-покрытие)	0,0001 мм (напыление)
Zn	56	11,2	-	0,098	0,039	0,000195
Sn	71	14,2	0,62	-	0,05	0,00025
Ni	58	11,6	-	0,102	0,041	0,000205
Cr	55	11	0,48	-	0,038	0,00019
Ag	85	17	0,74	-	0,059	0,00029
Au	155	31	1,35	-	0,108	0,00054

Применение и основные характеристики коррозионных свойств, наиболее широко применяемых в промышленности металлических материалов, предлагается рассмотреть подробнее. Коррозионные качества некоторых материалов будут рассмотрены, в основном, при влиянии атмосферных сред, повышенной влажности и высоких температур, что соответствует условиям эксплуатации, рассматриваемого данной работой изделия. [19]

Цинк (Zn).

Zn используется в основном для защиты основного металла от коррозии в естественной среде. Почти 50% мирового потребления Zn связано с использованием его в качестве покрытия стальных изделий, эксплуатируемых в воздушной и водной среде.

Коррозионная стойкость Zn связана с его способностью формировать защитные слои, состоящие из оксида и гидроокиси или основных солей, в зависимости от природы среды. В результате образования защитных слоев, покрывающих всю поверхность металла, скорость коррозии снижается. В атмосферных условиях и при взаимодействии с водой защитные функции Zn связаны с образованием на поверхности окисной пленки.

Zn обладает отличной стойкостью на воздухе. Сразу же в момент формирования слоя окиси Zn, образующегося на первом этапе, коррозия останавливается. Скорость коррозии Zn растет в присутствии воды.

В производственной среде коррозия Zn также возрастает. В данном случае, при образовании значительных осадков в атмосфере в виде туманности, пленка Zn, покрывающая металл, становится кислой. В этом случае Zn растворяется, однако, в процессе коррозии, снова образуются защитные соли, обеспечивающие дальнейшую защиту металла.

Если Zn опустить в обычную питьевую воду, имеющую в составе растворенный кислород, происходит длительное образование защитной пленки из гидроокиси Zn. Пленка покрывает практически всю поверхность, но в некоторых местах металл остается незащищенным и продолжается локальное разрушение. Коррозия не распространяется на всю поверхность Zn, а концентрируется только в этих участках. Если доступ кислорода будет одинаковым ко всей поверхности, то защитная пленка гидроокиси Zn покроет всю поверхность металла.

Многие естественные воды характеризуются различным содержанием растворенных солей, которые создают на поверхности металла отложения. Поскольку такие пленки влияют на защитное действие, то коррозия металла будет меньше в жесткой воде. Соответственно, зачастую бывает так, что дистиллированная вода гораздо агрессивнее естественной.

Скорость коррозии Zn в воде сильно зависит от ее температуры. Установлено, что в интервале температур 65 – 70 °С скорость коррозии достигает максимума и адгезия с основным металлом ухудшается, это связано с природой защитной пленки. При более низких температурах пленка студенистая и прочно связана с поверхностью. При этом, если температура воды выше 75 °С адгезия вновь возрастает и пленка приобретает более тонкую и плотную структуру.

Помимо явных положительных сторон, применения Zn в качестве защитного материала основного металла, имеются несколько значительных недостатков:

- слабая стойкость к высокой влажности;
- применяется в качестве покрытия ограниченного числа типов сталей;
- недолговечность;
- резко возрастает скорость коррозии в интервале температур 65 – 70 °С;
- невысокие декоративные свойства;
- процесс цинкования требует специальных добавок;
- сталь, при покрытии Zn, подвергается наводороживанию;
- необходима дополнительная обработка после нанесения материала (удаление наводороживания, хроматная обработка и т.п.). [33]

Алюминий (Al) и его сплавы.

Чистый Al характеризуется высокой коррозионной стойкостью, низкой механической прочностью и большой пластичностью. Для удовлетворения разнообразных требований оборудования применяется значительное число алюминиевых сплавов.

Чистый Al (99,8 и 99,9 %) применяется на изделиях с повышенными требованиями к коррозионной стойкости и вязкости материала. Уменьшение чистоты до 99 и 99,5 % ведет к возрастанию прочности Al.

Сплав Al-Mg характеризуется хорошей коррозионной стойкостью и прочностью, что делает его отличным вариантом для изготовления конструкций, работающих в агрессивных средах. При этом, следует

избегать повышенных температур, что может привести к серьезной коррозии.

Коррозионная стойкость сплава Al- Mg- Si несколько ниже, чем сплава Al- Mg, но в тех случаях, когда необходима максимальная прочность – он предпочтительнее.

Сплав материалов Al- Cu следует применять там, где основным требованием является высокая прочность и можно примириться с небольшой коррозионной стойкостью. Если условия не крайне агрессивные, то можно рассчитывать на удовлетворительную стойкость, но при этом, следует применять анодирование или окраску.

Сплавы Al- Zn- Mg предназначаются для изделий с повышенными требованиями к прочности. Эти сплавы характеризуются суммарным содержанием Zn+ Mg значительно выше 6% и применяются в специальных (например, авиационных) конструкциях. Неверный выбор состава таких материалов может увеличить опасность коррозионного растрескивания и для общего назначения эти сплавы применять нельзя.

Стойкость Al во влажных средах обеспечивает защитная окисная пленка, возникающая на поверхности металла, в результате чего скорость коррозии Al быстро уменьшается со временем. Влажная среда приводит к возрастанию толщины защитной пленки Al. Рост толщины пленки ускоряется при повышении температуры и влажности.

Следует обратить внимание, касающегося влияния легирующих элементов и примесей на коррозионную стойкость алюминиевых сплавов.

Cu оказывает негативное влияние, повышая чувствительность к межкристаллитной и общей коррозии, поэтому сплавы, содержащие Cu, считаются менее коррозионностойкими. Содержание Mg до 5% повышает коррозионную стойкость алюминиевых сплавов в морской воде. [48]

На открытом воздухе алюминиевые сплавы имеют свойство менять цвет и могут быть как серыми, так и черными. Сначала формируется небольшая питтинговая коррозия, которая со временем замедляется.

В агрессивных средах стойкость Al проявляется по-разному, в зависимости от количества и концентрации агрессивных элементов. К таким средам можно отнести атмосферу морской и промышленной среды. При этом, дождь в этих условиях, оказывает положительное влияние, а сырость или конденсация могут усилить коррозию.

В городской местности на поверхности материала могут оседать угольные частицы, попадающие в атмосферу в результате сгорания топлива. Это может привести к сильной питтинговой коррозии.

В помещении Al неплохо сохраняет свой внешний вид и, по прошествии длительного времени, может лишь слегка потускнеть. Наличие влаги на поверхности может ускорить разрушение поверхности, но в крайнем случае, приведет к коррозии пятнами.

Al и его сплавы имеют отличную коррозионную стойкость в дистиллированной воде. В морской загрязненной воде может образоваться питтинговая коррозия Al, для борьбы с которой допускается применять химическую обработку с последующим нанесением хроматного грунта.

Рост температуры воды ускоряет коррозию в имеющихся питтингах, но при температуре выше примерно 50 °C зарождение новых питтингов прекращается. Высокие температуры в сухих атмосферах не влияют на коррозионную стойкость Al к любым обычным газам. Во влажных средах при температуре ниже 90 °C коррозия Al носит, как правило, питтинговый характер. При температуре до 250 °C происходит равномерное разрушение Al. Продукты, образующиеся при равномерной коррозии, создают на поверхности металла пленку. Именно от данной пленки зависит скорость коррозии.

Не смотря на значительные коррозионные свойства Al и его сплавы имеют несколько существенных недостатков:

- высокая стоимость применения;
- опасность возникновения электрической коррозии;
- низкая упругость;

- невысокая адгезия с основным металлом при толщине покрытия не более 0,3 мм;
- требуется дополнительная химическая обработка при эксплуатации поверхности во влажных средах. [34]

Медь (Cu) и медные сплавы.

Скорость коррозии Cu очень невелика. Многие медные сплавы гораздо стойки к коррозии, по сравнению с Cu, что объяснимо, наличием в сплаве коррозионностойких металлов (Ni, Sn, Al, Be), присутствие которых формирует защитные окисные пленки.

Стойкость Cu и ее сплавов к атмосферной коррозии связана с образованием на поверхности защитных пленок продуктов коррозии, препятствующих дальнейшему разрушению. Наличие влажности в атмосфере оказывает различное влияние на стойкость против коррозии. При влажности менее 63% скорость коррозии невелика, но при влажности в 75%, коррозия возрастала и ускорялась, при увеличении концентрации двуокиси серы в воздухе. В атмосфере, содержащей сероводород, Cu быстро тускнеет.

В водных средах существует три типа коррозии Cu и медных сплавов: ударная коррозия (поток воды обтекает Cu или медный сплав, при этом пузырьки воздуха, увлекаемые водой, лопаются и ударяют поверхность металла. Факторы, усиливающие коррозию: увеличение скорости потока, загрязнение воды, рост числа и размеров пузырьков), обесцинкование латуней (пораженные участки латуни замещаются пористой массой Cu, которая обеспечивает изначальную форму изделия, но имеет минимальную прочность. Скорость процесса увеличивается при росте концентрации Zn. Факторы, усиливающие коррозию: высокая температура, концентрация хлоридов в воде и малая скорость ее течения). На растворение Cu оказывает влияние горячая, мягкая, кислая вода. Коррозия является равномерной, поэтому уменьшение толщины металла практически не сказывается на сроке службы изделия).

Недостатки применения Cu и ее сплавов:

- подверженность атмосферной коррозии с образованием оксидных и сульфидных пленок;
- слабые механические свойства против воздействия водорода, что приводит к возникновению трещин и, соответственно, хрупкости и ломкости материала;
- испарение Cu, при использовании омедненных сварочных проволок, в процессе нанесения покрытия на металлы, что приводит к ухудшению условий труда и увеличению концентрации вредных примесей в воздухе рабочей зоны;
- высокая стоимость;
- не применяются в качестве основного материала покрытий, а только как промежуточный (например для последующего нанесения хромоникелевого покрытия);
- наносится на основной металл минимально возможным количеством методов нанесения покрытий, что ограничивает применение данных материалов для изделий разных по конструкции и габаритам (например эти материалы нельзя применить для покрытия больших площадей крупных сборочных изделий). [35]

Олово (Sn) и его сплавы.

Использование нелегированного Sn ограничено его низкой температурой плавления и небольшой прочностью.

При атмосферной коррозии окисление Sn в сухом воздухе протекает медленно. Металл сохраняет свои внешние качества при температуре ниже 180 °C. Рост влажности в атмосферных условиях, не имеющих загрязняющих газов или пыли формирует повышение скорости окисления и образует пожелтение металла.

В загрязненной атмосфере на Sn возникают элементы коррозии. В загрязненном воздухе промышленных помещений происходит сильная коррозия Sn (могут повлиять например, пары некоторых кислот, влажная

двуокись серы, сероводород, что вызывает появление сульфидного налета).

В помещениях, не содержащих серьезных загрязнений, на Sn возникает серая пленка, масса которой со временем растет. Если с поверхностью ничего не делать – ее отражательная способность уменьшится, но постоянная очистка позволит предотвратить это.

При постоянном нахождении Sn в естественных условиях на воздухе коррозия протекает постепенно, а ее скорость замедляется. Sn приобретает матовый цвет, и на нем формируется толстый слой, состоящий из окиси Sn.

Sn обладает высокими коррозионными качествами в чистой воде, но если водные растворы содержат высокий уровень хлоридов, сульфатов или нитратов, то коррозия возникает достаточно регулярно.

Недостатки применения Sn и его сплавов:

- низкая производительность процесса на нанесения покрытий;
- высокая трудоемкость процесса;
- высокая текучесть материала;
- ограниченность температурного режима эксплуатации металла основы изделий;
- невысокая прочность;
- слабая стойкость против атмосферной коррозии;
- необходимость постоянной очистки оловянных покрытий для сохранения декоративных качеств и отражательной способности;
- неприменимость для нанесения покрытий на большие площади крупногабаритных конструкций, т.к. в основном покрытия выполняются методом горячего погружения или электроосаждения. [21]

Никель (Ni) и его сплавы.

Ni характеризуется значительными механическими свойствами и неплохой стойкостью во многих агрессивных средах. Важно то, что Ni образует большой круг сплавов, обладающих необходимыми

техническими и антикоррозионными свойствами (например, Ni-Cr, Ni-Cu, Ni-Mo, Ni-Cr-Fe).

В атмосферных условиях Ni и его сплавы имеют высокую коррозионную стойкость. Внешний вид Ni портится во влажной загрязненной атмосфере из-за потускнения, которое образуется путем окисления двуокиси серы из загрязненной атмосферы на поверхности Ni.

Появляющаяся на поверхности Ni пленка серной кислоты вызывает коррозию, продуктом которой является основной сульфат никеля. Появление сульфата и является потускнением.

При нахождении Ni и никелевых сплавов на открытом воздухе, когда их поверхность омывается дождем, образование слоев продуктов коррозии на поверхностях этих металлов не наблюдается, однако, при их нахождении, например под навесом, продукты коррозии начинают проявляться.

Ni и его сплавы неплохо проявляют себя, как коррозионностойкие материалы против воздействия пресной и морской воды. Защитная пленка Ni, а также сплавов Ni-Cr, Ni-Cu поддерживается в хорошем состоянии, если скорость потока воды превышает примерно 2м/с, потому что в стоячей воде наблюдается возникновение питтинговой коррозии.

Основными недостатками Ni являются:

- высокая стоимость;
- учитывая, что никель способен поглощать большое количество газов, то его механические свойства начинают уменьшаться. [34]

Хром (Cr) имеет значительные свойства защиты от коррозии в атмосферных условиях, в воде, под влиянием различных кислот.

Благодаря высокому сопротивлению Cr коррозии его можно применять в виде покрытий на металле с меньшей коррозионной стойкостью. Cr образует стабильную, плотно прилегающую, с неплохой адгезией, тугоплавкую самоуплотняющуюся пленку окисла Cr_2O_3 . Металл, имеющий такую пленку, способен к высокой стойкости в

атмосферных условиях. В отличие от серебра и меди Cr не тускнеет при действии сероводорода, не темнеет подобно никелю в атмосфере, содержащей сернистый газ.

Cr имеет значительную адгезию с различными углеродистыми сталями, чугунами, цветными металлами и сплавами. Для защиты от коррозии обычно применяют значительную толщину хромового покрытия из-за его высокой пористости и тенденции к растрескиванию.

Основными недостатками применения Cr могут быть:

- с увеличением толщины покрытия возрастает шероховатость относительно шероховатости основного металла в 1,5-2 раза;
- тонкие слои Cr значительно подвержены пористости и растрескиванию;
- природная хрупкость;
- негативное влияние на окружающую среду.

Хромоникелевые (Cr-Ni) сплавы.

Применение Cr и Ni позволяет формировать покрытия с большой толщиной, равномерностью и твердостью, по отношению к металлам основы. Эксплуатационные и физико-механические свойства деталей взаимосвязаны с содержанием химических элементов в поверхности изделия.

Стали, обладающие значительным сопротивлением электрохимической коррозии, являются коррозионностойкими (нержавеющими).

Коррозионностойкими качествами владеют легированные стали. Главными легирующими элементами, формирующими коррозионную стойкость сталей, являются Cr и Ni. [21]

Коррозионностойкие стали подразделяются на хромистые и хромоникелевые.

Коррозионная стойкость хромоникелевых сталей (как и хромистых) определена в основном формированием на поверхности сплава защитной пассивной пленки. Хромоникелевые стали обладают несколько более высокой коррозионной стойкостью, чем хромистые стали. Объясняется

это наличием в сплаве Ni, который способствует образованию мелкозернистой однофазной структуры и повышает стойкость стали. В атмосферных условиях хромоникелевые стали также достаточно устойчивы.

Основными недостатками хромоникелевых сплавов являются:

- высокая стоимость, которая обусловлена тем, что они содержат много дорогого Ni.
- незначительная прочность при комнатной температуре, прежде всего, по пределу текучести.

Для более широкого ознакомления и понимания значения металлических материалов, в качестве антикоррозионных, предлагается к рассмотрению область их применения в различных средах (табл. 8). [32]

Таблица 8 - Области применения металлических материалов, в качестве защитных, в различных средах. [19]

№ п/п	Металл покрытия	Основной материал	Применение в различных средах, областях
1	Zn	Сталь, сплавы алюминия	Атмосферные условия, бензин, вода, почва
2	Al	Сталь, алюминиевые сплавы	Атмосферные условия (в т.ч. промышленная), вода в контакте с почвой, высокотемпературное окисление, горячие газы
3	Cd	Сталь, цветные металлы	Влага, морская вода, хлористые соли, пары органических веществ
4	Cr	Сталь, алюминий, медь и ее сплавы, цинк и его сплавы	Сельская, промышленная атмосфера, сероводород, высокие температуры (до 800 °С), против износостойкости, высокотемпературное окисление
5	Ni	Стали или сплавы цинка, медь и ее сплавы, алюминий, пластмассы	Атмосферные условия, высокие температуры, пресная и морская вода, против износостойкости, для обеспечения твердости
6	Cu	Сталь, сплавы стали, пластмассы	Для защиты хромоникелевых покрытий, в виде промежуточного слоя, для гравирования, атмосферные условия, водные среды, для поверхностей с хорошей плавкостью и электропроводностью
7	Pb	Сталь или медь	Кислоты, водная среда, почва, для обеспечения высокой плавкости, для звукоизоляции

Продолжение таблицы 8

№ п/п	Металл покрытия	Основной материал	Применение в различных средах, областях
8	Sn	Сталь, медь и ее сплавы	Атмосферные условия, водная среда, органические кислоты, в пищевой промышленности для изготовления консервных банок, для создания хорошей плавкости и электропроводности поверхностей
9	Au	Медь и ее сплавы, пластмассы	Для хорошей электропроводности в электронике
10	Ag	Медь и ее сплавы, никель и его сплавы, пластмасса	Для защиты поверхностей химических установок, для защиты изделий в электронной промышленности, для обеспечения повышенной электропроводности

Проведя анализ, максимально распространенных защитных, от воздействия коррозионных и абразивных сред, неметаллических и металлических материалов, с учетом выявленных недостатков, приемлемых физических свойств материалов и режимов эксплуатации поверхностей валов, были определены следующие покрытия, которые будут наноситься разными методами напыления:

- в качестве напыления способом активированной дуговой металлизации предлагается применить: для подслоя сварочную проволоку нихром НП Х20Н80 ГОСТ 10543-98 Ø 1,6 мм; для основного защитного слоя сварочную проволоку Св-20Х13 ГОСТ 2246-70 Ø 1,6 мм.
- в качестве напыления способом газопламенного напыления предлагается применить самофлюсующийся порошок марки Metco 18С.
- в качестве напыления способом плазменного напыления предлагается применить: для подслоя порошок марки Ni80Cr20 (нихром), для основного защитного слоя порошок марки $Al_2O_3 + TiO_2$.

Таким образом, задачами диссертации являются:

- Разработка методики исследования, оснастки и оборудования для активированной дуговой металлизации, газопламенного напыления и

плазменного напыления защитных износостойких и коррозионностойких покрытий из порошковых и проволочных материалов на основной металл валов из стали 40Х.

– Исследование процессов активированной дуговой металлизации, газопламенного и плазменного напыления и разработка типовых технологического процесса напыления.

– Исследование механических и эксплуатационных свойств коррозионностойких покрытий, нанесенных активированной дуговой металлизацией, газопламенным и плазменным напылением.

– Исследование и анализ результатов оценки количественных и качественных характеристик износостойких и коррозионностойких покрытий, выполненных методами активированной дуговой металлизацией, газопламенным и плазменным напылением на реальных изделиях и отработка технологических процессов нанесения покрытий.

2 Методика исследования процессов и свойств активированной дуговой металлизации, газопламенного и плазменного напыления покрытий валов насосного оборудования

2.1 Методика проведения исследования процессов активированной дуговой металлизации, газопламенного и плазменного напыления

Исследование процессов активированной дуговой металлизации валов проводилось при помощи установки АДМ-10, газопламенного напыления с помощью установки Castodyn DS 8000, плазменного напыления с помощью установки УПУ-8М. Все три способа напыления сопровождались предварительной подготовкой напыляемой поверхности аппаратом абразивно-струйной очистки АСО-200.

Аппарат АСО-200 (рис. 23) использовался для струйно-абразивной очистки металлических поверхностей с целью повышения адгезионного потенциала, удаления продуктов окисления, коррозии, придания необходимой шероховатости. Данный аппарат устанавливается на ровную площадку. В качестве материала для очистки поверхности использовался абразивный порошок. Аппарат был подключен к источнику сжатого воздуха (компрессор KAESER ASD 57) через фильтр подготовки воздуха с помощью рукава. Основными элементами аппарата АСО-200 являются (рис. 24): ресивер, образующий рабочую камеру аппарата, загрузочный бункер с сеткой, дозатор абразива, напорный рукав и блок управления, обеспечивающий функциональное назначение аппарата. Технические характеристики данного аппарата представлены в таблице 9. [38]

Для проведения исследований применялись образцы из стали 40Х размером 100×100 мм и толщиной (S) 14 мм.

Последовательность и требования, при струйно-абразивной очистке на аппарате АСО-200 данных образцов, были следующими:

- подача сжатого воздуха (давлением 5 атм.);

- нажатие ручки пневмораспределителя до упора и удержание его в данном положении;
- рычагом дозатора было отрегулировано количество подаваемого абразивного материала;
- сопло аппарата находилось на расстоянии 100 – 150 мм от обрабатываемой поверхности;
- обработка проводилась под углом наклона сопла 60°;
- скорость перемещения сопла составляла 20 – 30 см/с;
- по окончании струйно-абразивной обработки, поверхность образцов подверглась обеспыливанию сжатым воздухом.

После абразивной обработки шероховатость (Rz) поверхности составила 80 мкм.



Рисунок 23 - Аппарат струйно-абразивной очистки АСО-200. [38]

Таблица 9 - Основные технические характеристики аппарата струйно-абразивной очистки АСО-200. [38]

Наименование параметра	Величина
Объем ресивера, л.	190
Производительность очистки, м ² /ч.	4 – 20
Максимальное рабочее давление сжатого воздуха, МПа	0,7

Продолжение таблицы 9

Наименование параметра	Величина
Расход абразивного материала, при давлении 0,6 МПа, кг/ч, (при диаметре сопла 10 мм)	550
Размер частиц абразивного материала, мм	0,1 – 2,5
Длина напорного рукава, м.	10 – 40
Внутренний диаметр напорного рукава, мм	32
Диаметры применяемого сопла, мм	6 – 12
Масса (без абразивного материала), кг.	160 – 220
Габаритные размеры, мм:	
- длина	1000
- ширина	850
- высота	1400

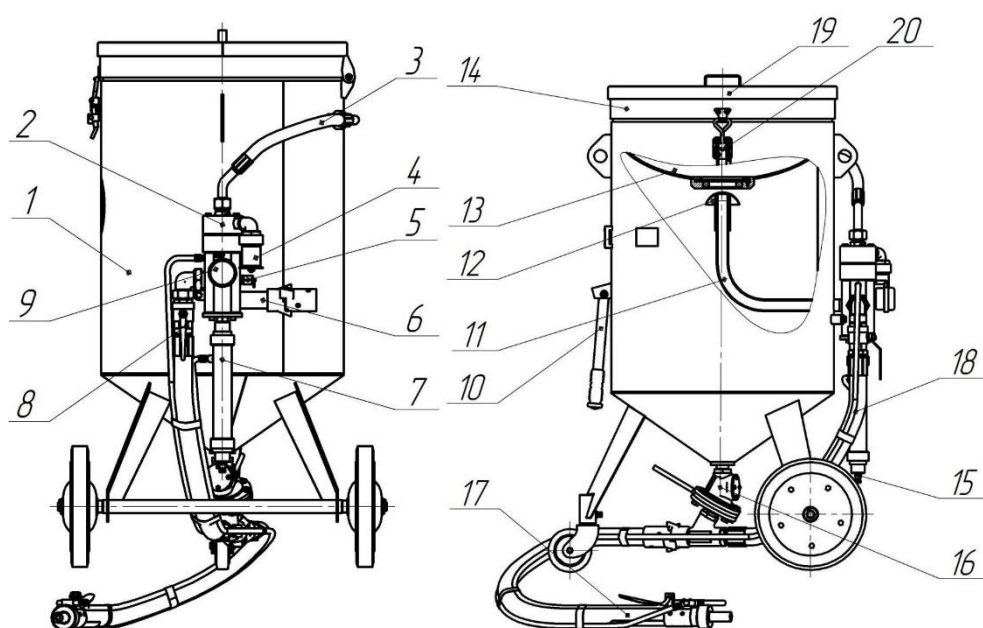


Рисунок 24 - Схема аппарата струйно-абразивной очистки АСО-200. [38].

1- ресивер, 2 – блок управления, 3 – рукав сброса давления, 4 – глушитель, 5 – клапан предохранительный, 6 – патрубок с байонетным соединением для подсоединения к системе сжатого воздуха, 7 – фильтр очистки воздуха, 8 – кран Ду32, 9 – манометр, 10 – ручка, 11 – патрубок, 12 – клапан загрузки, 13 – загрузочный бункер, 14 – сетка, 15 – пробка сливная, 16 – дозатор, 17 – рукав напорный, 18 – рукав, 19 – крышка, 20 – пневмораспределитель.

По окончании абразивной обработки на поверхность образцов №1 и №2 наносилось покрытие методом активированной дуговой металлизации с помощью установки АДМ-10 (рис. 25).

В основе работы установки лежит процесс плавления проволок электрической дугой и распыление расплавленного металла высокоскоростной струей транспортирующего газа.

Сущность этого процесса состоит в том, что на две проволоки, выполняющие роль электродов, подается напряжение. Проволоки с постоянной скоростью поступают в распылительную головку металлатора, где в результате их сближения между ними возникает электрическая дуга и происходит плавление. Транспортирующий газ (сжатый воздух + пропан) сдувает частицы расплавленного металла с торцов проволок, подхватывает их, разгоняет до высокой скорости и обеспечивает доставку к поверхности обрабатываемой детали. Технические характеристики данной установки представлены в таблице 10. [1] Напыляемым материалом являлась: для подслоя сварочная проволока нихром НП Х20Н80 ГОСТ 10543-98 Ø 1,6 мм; для основного защитного слоя сварочная проволока Св-20Х13 ГОСТ 2246-70 Ø 1,6 мм. Данная установка была подключена с помощью воздуховода к магистральной сети сжатого воздуха. Процесс напыления поверхностей, предварительно обработанных абразивным материалом образцов, методом активированной дуговой металлизации проволокой для подслоя нихром НП Х20Н80 ГОСТ 10543-98 Ø 1,6 мм; для основного защитного слоя проволокой Св-20Х13 ГОСТ 2246-70 Ø 1,6 мм, происходил в следующей последовательности и с соблюдением требований:

- подготовка установки к работе: осмотр составных частей, осмотр вентиляции, осмотр и применение всех средств индивидуальной защиты;
- соединение всех элементов установки с источником питания;
- загрузка катушек с сварочной проволокой в блок подачи проволоки;
- подключение установки через воздуховод к магистральной сети и источника тока с электросетью;
- подключение баллона с пропаном. Баллон должен находиться в закрепленном положении, на расстоянии не менее 5 м от места производства

работ в открытом состоянии или 1,5 м если баллон в металлическом вентилируемом ящике;

– расположение образцов на специально подготовленных вспомогательных приспособлениях;

– ось сопла горелки была направлена к поверхности под углом примерно 60° ;

– напыление производилось в диапазоне от 6 до 10 проходов. Толщину слоя получали многократным повторением процесса напыления путем последовательного напыления перекрывающихся параллельных полос. Величина перекрытия составила $1/3$ полосы. Каждый последующий слой напылялся в направлении, перпендикулярном предыдущему. Толщина наносимого слоя за один проход составила 10 – 60 мкм (измерено микрометром МК25);

– скорость перемещения горелки – 50 см/с (измерено часами) (более низкая скорость перемещения может привести к перегреву металлизационного слоя с дальнейшим его растрескиванием);

– дистанция напыления (расстояние от торца воздушного колпачка горелки до обрабатываемой поверхности объекта) составляла 100 – 120 мм.

– режимы напыления настраивались на панели источника питания установки и составили: скорость подачи проволоки (V) – 6 мм/с, напряжение (U) – 32 В, ток (I) – 160 - 180 А, давление сжатого воздуха (P) – 0,35 МПа.



Рисунок 25 - Установка активированной дуговой металлизации АДМ-10. [1]

Таблица 10 - Основные технические характеристики установки активированной дуговой металлизации АДМ-10. [1]

Наименование параметра	Значение
Материал применяемой проволоки	алюминий, бронза, латунь, медь, молибден, нихром, сталь
Диаметры применяемой электродной проволоки, мм	от 1,6 до 2,2
Скорость подачи проволоки, м/мин	от 0 до 6,3
Регулирование скорости	плавное
Электродвигатель привода подачи проволоки тип	ДПР-72-Ф6-06
номинальная мощность, кВт	0,045
номинальная частота вращения, об/мин	6000
Редуктор привода подачи	червячный
Токоподвод на электродные проволоки: напряжение, В	от 17 до 40
рабочий ток, А	от 100 до 380
Рабочее давление газов, МПа:	
- воздух	от 0,6 до 0,8
- пропан	от 0,2 до 0,4
Общий расход воздуха при 6 атм., м ³ /мин	1,5
Габаритные размеры металлизатора, мм	290x255x75

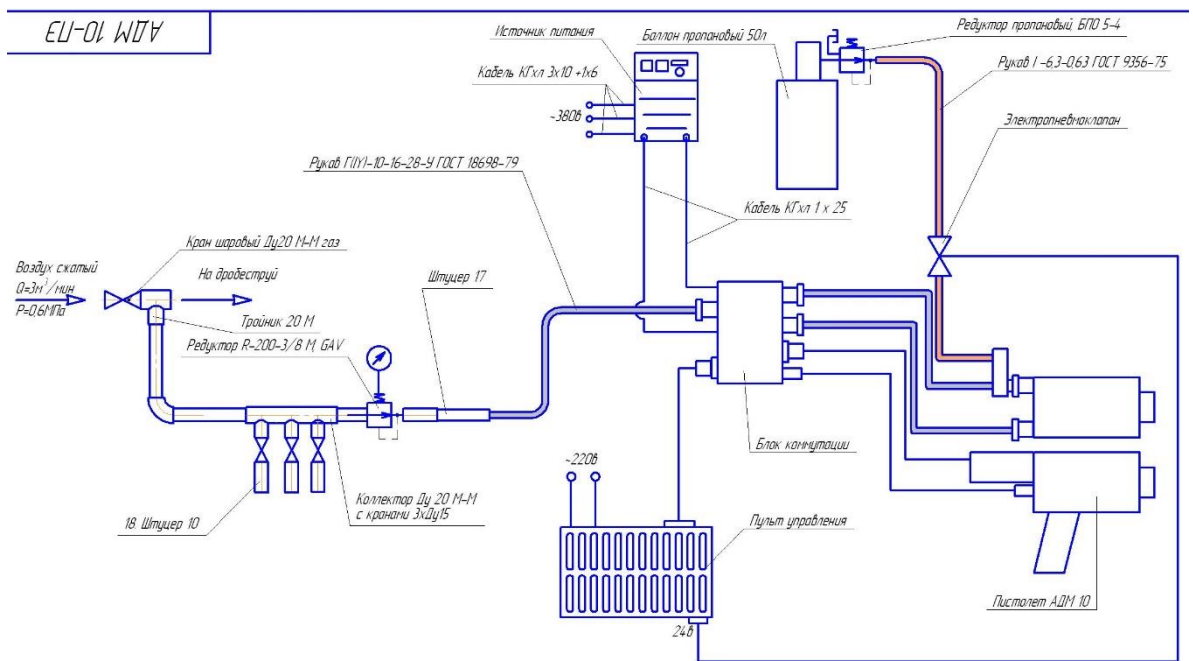


Рисунок 26 – Схема разводки установки активированной дуговой металлизации АДМ-10.

По окончании абразивной обработки на поверхность образцов №3 и №4 наносилось покрытие методом плазменного напыления с помощью установки плазменной универсальной УПУ-8М (рис. 26). Данная установка предназначена для нанесения металлических и керамических порошков материалов, а также материалов в виде проволоки на поверхности деталей и сборочных единиц методом плазменного напыления в условиях эксплуатации, соответствующих климатическому исполнению УХЛ. Технические характеристики данного аппарата представлены в таблице 11. Установка по сравнению с существующими имеет ряд преимуществ:

- расширены технологические возможности за счет применения двух дозаторов, что позволяет изменять природу порошка, производить напыление смесью двух порошков, осуществлять непрерывный процесс напыления переходом с одного дозатора на другой, возможности напыления проволокой;
- увеличена длина шлангов с 2,2 м до 6,6 м, что позволяет значительно расширить номенклатуру и размеры напыляемых изделий;

- улучшено качество напыления за счет варьирования количества вводимой в плазмотрон энергии, а также изменения природы напыляемого порошка и создания различных его композиций;
- увеличен ресурс работы плазмотрона за счет плавного нарастания тока после возбуждения дуги, возможности работы на пониженных (меньше 315 А) токах, при повышенных (180 В) напряжениях и применения бидистиллята для охлаждения плазмотрона.

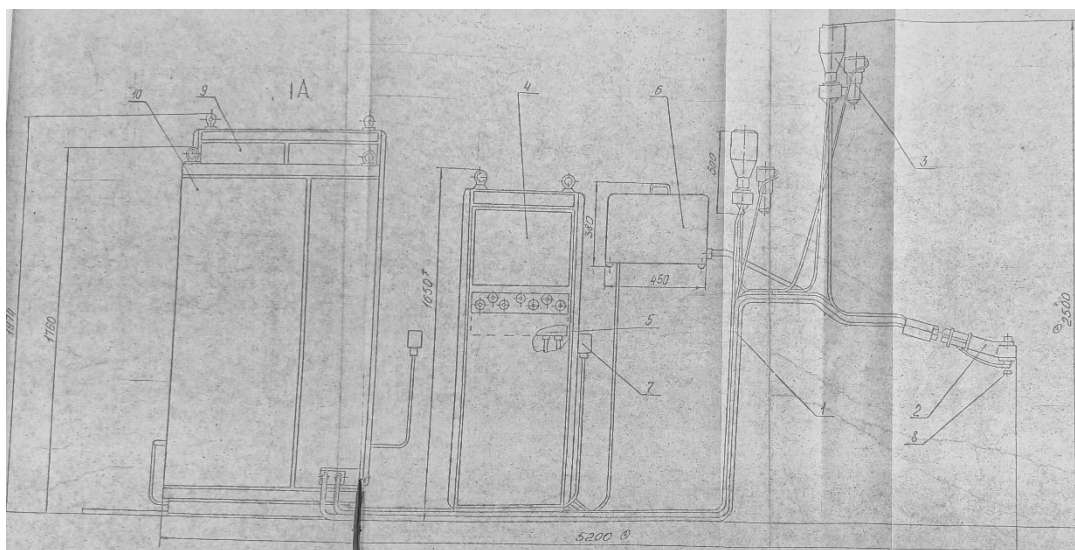


Рисунок 26 – Установка плазменная универсальная УПУ-8М.

- 1 – газовоэлектроразводка; 2 – плазмотрон; 3 – дозатор; 4 – шкаф управления; 5 – блок газообеспечения; 6 – механизм подачи проволоки; 7 – пульт дублирующий; 8 – винт настройки; 9 – система охлаждения плазмотрона; 10 – выпрямитель для плазменного напыления ВПН-630.

Таблица 11 - Основные технические характеристики установки плазменной универсальной УПУ-8М.

Основные технические характеристики:	
Мощность плазмотрона, кВт	40-10%
Диапазон рабочего тока, А	(100÷700)±10%
Диапазон рабочего напряжения на плазмотроне, В, не уже:	
- турбулентном дозвуком	25÷70
- турбулентном с межэлектродными вставками	80÷100
Не стабилизация тока, %, не более	3,0
Количество порошковых дозаторов, шт.	2
Объем дозатора, м ³	45×10 ⁻⁴ ±45×10 ⁻⁵
Максимальная производительность подачи порошка дозатором, кг/ч	
- по Al ₂ O ₃	5±0,25
- по W	20±1
Диаметр проволоки для напыления, мм	0,8÷1,2
Скорость подачи проволоки для напыления, м/с	0,0051-0,368

Продолжение таблицы 11

Основные технические характеристики:	
Объем бидистиллята в системе охлаждения плазматрона, м ³ , не менее	0,06
Пропускная способность системы охлаждения плазматрона, м ³ /с, не менее	0,0002
Максимальная температура бидистиллята, °С	50±10%
Расход воды на охлаждения бидистиллята, м ³ /с, не менее	0,0004
Плазмообразующий и транспортирующий газы	аргон, азот
Расход газа, м ³ /с:	
- плазмообразующего	$5 \times 10^{-4} \div 83 \times 10^{-5}$
- транспортирующего	$33 \times 10^{-6} \div 25 \times 10^{-5}$
Габаритные размеры, мм, не более:	
шкафа управления:	
- длина, мм	600
- ширина, мм	400
- высота, мм	1650
системы охлаждения плазматрона:	
- длина, мм	930
- ширина, мм	656
- высота, мм	1974
выпрямителя для плазменного напыления:	
- длина, мм	1000
- ширина, мм	880
- высота, мм	1760
Масса плазматрона, кг	1,1
Масса установки, кг	2100

По окончании абразивной обработки на поверхность образцов №5 и №6 наносилось покрытие методом газопламенного напыления с помощью горелки Castodyn DS 8000 (рис. 27). Горелка Castodyn DS 8000 является универсальным многоцелевым оборудованием предназначенным для газопламенного порошкового напыления и наплавки порошков на основе железа, никеля, кобальта, меди, цинка, алюминия, олова, а также нанесения керамических и полимерных покрытий. Технология газопламенного напыления порошковых сплавов позволяет восстановить геометрию деталей, восстанавливать либо производить баббитовые подшипники, шейки валов, посадочные места, получать покрытия с низким коэффициентом трения (антифрикционные), наплавлять износостойкие покрытия, защищающие от абразивного и эрозионного износа, наносить антикоррозионное напыление на металлоконструкции и многое другое. Горелка CASTODYN DS 8000 очень

универсальна в применении. Горелка снабжается 4-мя быстросменными комплектами из распыляющего сопла и инжектора порошка (модуль). Каждый модуль имеет номер и предназначен для нанесения определенной серии порошковых сплавов.

Распыляющий модуль SSM 10 — предназначен для «холодного» напыления порошковых сплавов по технологии RotoTec. Используются порошковые сплавы на основе железа, никеля, меди иногда с добавлением карбидов вольфрама. Применяется в случаях, когда недопустимы структурные изменения основного металла и деформация напыляемых деталей (например, восстановление шеек валов). Температура нагрева детали не превышает 200°C.

Распыляющий модуль SSM 20 — предназначен для «горячего» напыления порошковых сплавов по технологии Eutalloy RW. Порошковые сплавы серии Eutalloy RW напыляются на деталь, а затем проплавляются горелкой CastoFuse (описание ниже). Используются порошки на основе никеля и кобальта иногда с добавлением карбида вольфрама. Таким способом получается плотное покрытие с прочным диффузионным сцеплением с основным металлом. Применяется для получения твердых, износостойких покрытий и покрытий, стойких к окислению при высоких температурах.

Распыляющий модуль SSM 30 — предназначен для напыления керамических порошков серии MetaCeram. Порошковые сплавы серии MetaCeram наносятся на предварительно нанесенный подслои. Применяются для защиты деталей работающих при очень высоких температурах, обеспечивают электроизоляцию и стойкость к интенсивному истиранию.

Распыляющий модуль SSM 40 — предназначен для напыления легкоплавких порошковых сплавов серии MicroFlo LT. Для нанесения порошковых сплавов серии MicroFlo LT требуется подключение сжатого воздуха. Применяются для защиты деталей от коррозии в случае напыления

порошковых сплавов на основе Zn и Al, а также для нанесения баббита и полимерных порошков.

CastoFuse — ацетиленокислородная горелка, разработанная специально для проплавления самофлюсующихся покрытий.

Работа с горелкой типа CastoFuse не требует специальной квалификации оператора. Единственный регулирующий элемент, установленный на ручке горелки, это клапан регулировки подачи ацетилена. Остальное управление осуществляется простым включением/выключением горелки. Уникальная система курка быстрого отключения позволяет сохранять рабочие параметры газов при перерывах в работе. Все основные узлы горелки имеют простой доступ для технического обслуживания.

Набор горелки CastoFuse состоит из ручки и трех насадок различных размеров, имеющих номера 20, 30 и 40. Набор из насадок трех различных размеров позволяет иметь три разных уровня по мощности пламени. В итоге с помощью набора CastoFuse можно осуществлять предварительный подогрев и проплавление покрытий на деталях различного размера и толщины.

Модульная насадка SF Lance предназначена для порошковой наплавки с одновременным оплавлением порошка горелкой CASTODYN DS 8000. Модульная насадка SF Lance позволяет наносить твердые и износостойкие покрытия на основе железа и никеля толщиной до 30мм. для защиты от различных видов износа и покрытия не подверженных окислению при высоких температурах на большие по площади поверхности.

Процесс наплавки порошков с одновременным оплавлением отличается высокой прочностью соединения наплавленного слоя с основным металлом, а также высокой производительностью процесса. Наплавку насадкой SF Lance чаще всего применяют совместно с автоматизированными системами и так как насадка является водоохлаждаемой, она позволяет производить наплавку порошка очень длительное время.

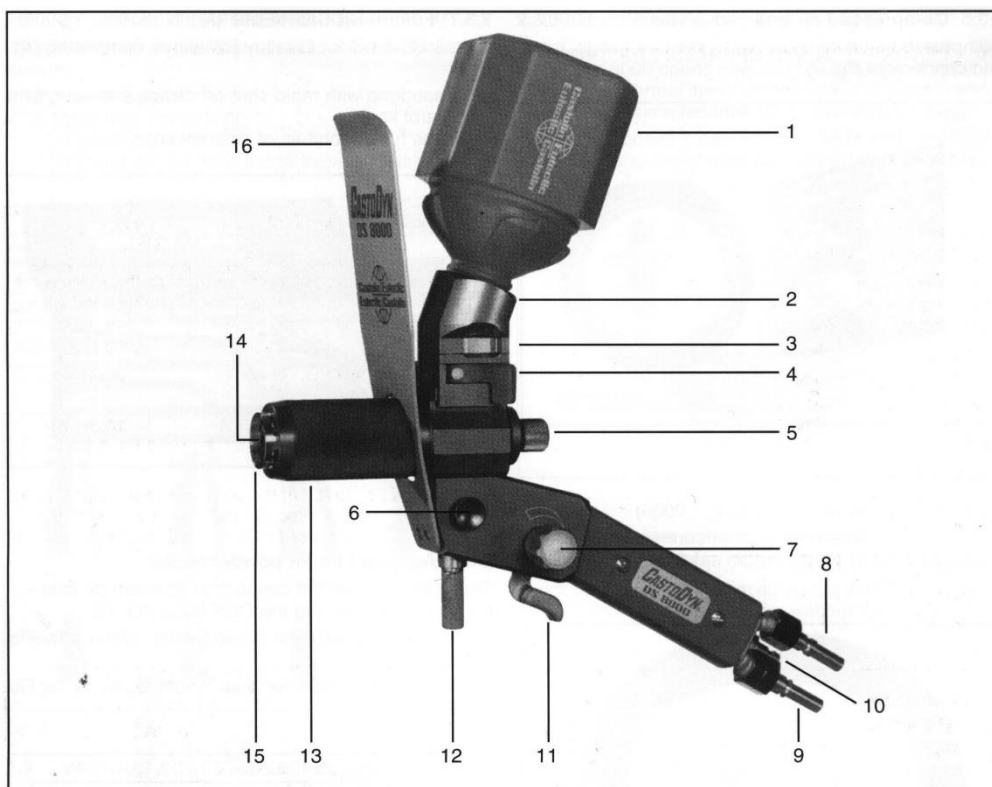
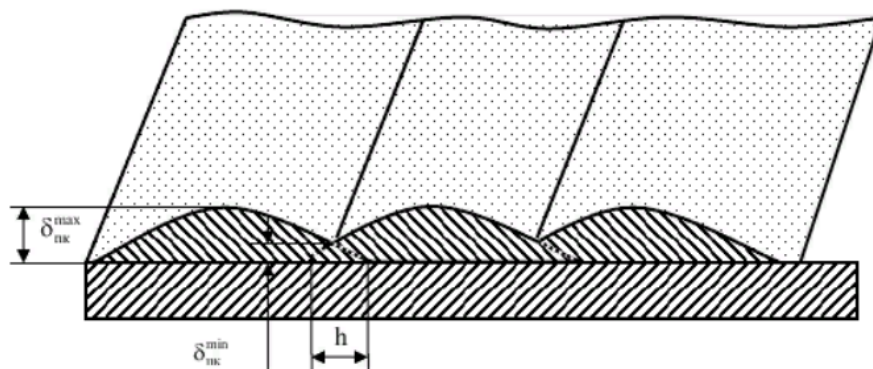


Рисунок 27 – Горелка Castodyn DS 8000.

1 - стандартная ёмкость для порошка; 2- подставка ёмкости с порошком; 3 - шестипозиционный регулятор расхода порошка; 4 - рычаг расхода порошка; 5 - инжектор порошка; 6 - клапан сжатого воздуха; 7 - вентиль расхода ацетилена; 8 - штырь быстроразъёмного соединителя для кислорода; 9 - штырь быстроразъёмного соединителя для ацетилена; 10 - штырь быстроразъёмного соединителя для сжатого воздуха; 11 - рычаг быстрого, одновременного отключения подачи кислорода и ацетилена; 12 - рукоятка для крепления горелки; 13 - рифлёная крепежная гайка модуля SSM; 14 - сопло пламени; 15 - сопло фокусирующее пламя, питаемое сжатым воздухом; 16 - теплоизолирующий щиток с таблицей параметров регулирующих подачу газов.

Геометрические параметры напыленных поверхностей образцов измерялись на предмет установления величины толщины покрытия (рис. 28). Минимальная толщина покрытия составила 120 мкм. Верхний предел толщины покрытия – 700 мкм. Толщина измерялась микрометром МК25, как разница толщины образца после и до напыления.



$\delta_{\text{пк}}^{\text{max}}$ – максимальная толщина покрытия; $\delta_{\text{пк}}^{\text{min}}$ – минимальная толщина покрытия;
 h – значение перекрытия напыляемых полос

Рисунок 28 - Схема измерения геометрических параметров металлизационного покрытия

Напыленные покрытия далее были подвержены исследованию на химическое содержание элементов, качество механических (твердость) и эксплуатационных (адгезия, пористость) свойств.

2.2 Методика исследования химического состава напыленных антикоррозионных покрытий

Химическое содержание покрытия исследовалось методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), суть которой заключается в учете различных сигналов, генерируемых в образце при сканировании его поверхности сфокусированным электронным зондом. Вторичные, отраженные и ожеэлектроны, рентгеновское излучения предоставляют сведения о структуре, фазовом и химическом содержании образца. Метод РЭМ соответствует ряду высоких требований:

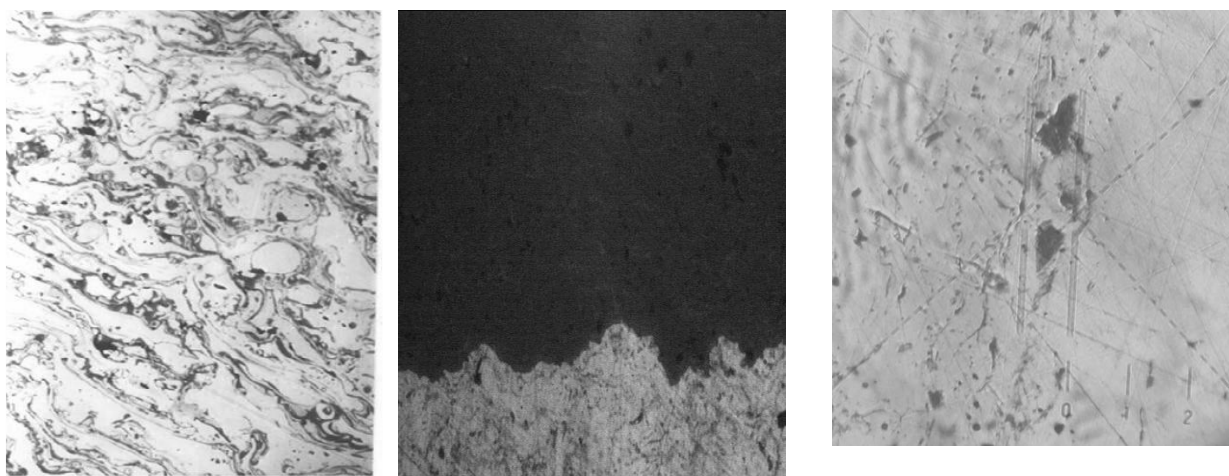
- значительная разрешающая способность;
- большая глубина фокуса;
- доступность изображения;
- легкость подготовки объектов исследований;
- большие возможности анализа применения систем регистрации рентгеновского излучения (волнодисперсионные (WDS) или энергодисперсионные (EDS) системы) дают возможность качественно использовать метод РЭМ в материаловедческих исследованиях для изучения структуры и состава покрытий, поверхностей химического взаимодействия.

[39]

К выполнению исследований были подготовлены образцы в виде пластин $100 \times 100 \times 14$ мм из стали 40Х, в количестве 6-ти штук, представляющие собой обработанную абразивным материалом поверхность, с нанесенным на нее металлизационным покрытием толщиной 0,1 – 0,7 (рис. 29, 30).



Рисунок 29 - Напыленные покрытия на образцы



1

2

3

Рисунок 30 - Микроструктура напыленных покрытий на образцы

1 - активированная дуговая металлизация проволокой Св-20Х13; 2 - плазменное напыление порошком: подслоя – Ni80Cr20 (нихром), основное покрытие – Al₂O₃ + TiO₂ (светло-серый); 3 - газопламенное напыление материал: порошок Metco 18с.

2.3.2 Методика исследования эксплуатационных свойств напыленных антикоррозионных покрытий

Пористость определялась способностью напыленного материала противостоять возникновению пор в покрытии. [41] Для определения пористости были изготовлены образцы из стали 40Х, параметрами 100×100 мм, с нанесенным покрытием:

- активированной дуговой металлизацией для подслоя сварочной проволокой нихром НП Х20Н80 ГОСТ 10543-98 Ø 1,6 мм; для основного защитного слоя сварочной проволокой Св-20Х13 ГОСТ 2246-70 Ø 1,6 мм;
- плазменным напылением для подслоя порошком марки Ni80Cr20 (нихром), для основного защитного слоя порошок марки $Al_2O_3+TiO_2$.
- газопламенным напылением самофлюсующимся порошком марки Metco 18С.

При испытаниях учитывали параметры открытой и сквозной пористости.

Открытую пористость исследовали путем измерения массы образцов на воздухе и в воде. Последовательность была следующей:

- сначала взвешивали образцы без покрытия на воздухе;
- затем взвешивали сухой образец с покрытием на воздухе;
- далее пропитывали в течение 30 минут образец с покрытием в воде и измеряли массу;
- после удаляли фильтрованной бумагой с поверхности образца с покрытием остатки влаги и определяли массу на воздухе.

Результат открытой пористости был измерен по формуле:

$$P_{\text{откр.}} = ((m_2 - m)\rho_o / (m_2 - m_1)\rho_o - m_0 \times \rho_{H_2O})100, \text{ где:}$$

m_0 – масса образца без покрытия, г.;

m – масса сухого образца с покрытием на воздухе, г.;

m_1 – масса пропитанного образца с покрытием в воде, г.;

m_2 – масса пропитанного образца с покрытием на воздухе, г.;

ρ_o – плотность материала основы, г/см³;

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ – плотность воды, г/см³.

Сквозную пористость исследовали путем погружения образцов в водный раствор [41], содержащий калий железосинеродистый и натрий хлористый, и выдерживали в течение 5 минут, при температуре окружающей среды 23,4 °С. Затем на контролируемой поверхности подсчитывали число синих точек, соответствующих числу пор покрытия. Среднее число пор рассчитывалось по формуле:

$$N_{\text{ср.}} = N_{\text{общ.}}/S, \text{ где:}$$

$N_{\text{ср.}}$ – среднее число пор;

$N_{\text{общ.}}$ – общее число пор на контролируемой поверхности;

S – площадь контролируемой поверхности, см².

Следует отметить, что контроль пористости проводился при следующих условиях окружающей среды: температура воздуха составила 23,4 °С, влажность воздуха - 58%, давление – 776 мм рт. ст./103.5 кПа.

Для исследования пористости покрытий образцов применялись весы электронные МК-3,2-А20 (рис. 32) и прибор контроля параметров воздушной среды «Метеометр МЭС-200А» (рис 33). [41]



Рисунок 32 - Весы электронные МК-3,2-А20. [41]



Рисунок 33 - Прибор контроля параметров воздушной среды «Метеометр МЭС-200А». [41]

Адгезионная прочность определялась способностью покрытия противостоять возникновению отслаиваний нанесенного материала с основным металлом. [41] Для определения адгезионной прочности были изготовлены образцы в виде пластин из стали 40Х, параметрами 100×100 мм и в виде цилиндров из стали 40Х, диаметром 25 мм и высотой 16 мм, с нанесенным на пластины и цилиндры покрытиями методами активированной дуговой металлизации, плазменного напыления, газопламенного напыления.

Исследования проводили путем нанесения сетки царапин на поверхность покрытия пластин и методом испытаний на отрыв цилиндров.

Сетку царапин на контролируемую поверхность образца наносили при помощи адгезионной решетки (рис. 34) и ножа с твердым лезвием. Сетка царапин состояла из квадратов размерами 25×25 мм, расстояния между царапинами – 5 мм. Царапины прорезали до основного металла.

Метод испытаний на отрыв проводили путем равномерного отрыва покрытия толщиной 0,2 мм, нанесенного на торец образцов, склеенного с контробразцом без покрытия (рис. 35). Цилиндры склеивали клеем марки ВК-51А. Прочность клея проверялась путем склеивания двух цилиндров без

покрытия в последовательности схожей исследованию адгезионной прочности покрытия с основным металлом:

- сначала наносили клей на торец контробразца, и склеивали с покрытием напыленного образца;
- затем обеспечили совмещение осей образца с покрытием, и контробразца с точностью 0,1 мм;
- далее, склеенные образцы, выдержали при комнатной температуре в течение 3–х суток до полного затвердевания клея;
- после, предварительно склеенные образцы, закрепляли в специальном центрирующем приспособлении, обеспечивающем соосность при наложении нагрузки, и помещали в универсальную испытательную машину 200 кН Inspekt-200 (рис. 36);
- испытания проводили путем плавного нагружения образца при скорости нагружения 1 – 10 мм/мин.

Прочность сцепления покрытия и клея определяли по формуле:

$$\sigma = F/S, \text{ где}$$

σ – прочность сцепления, МПа (кгс/см²);

F – разрывное усилие, Н (кгс/см²);

S – площадь поперечного сечения образцов, см².

Прочность сцепления покрытия вычисляли как среднее арифметическое результатов пяти испытанных образцов.

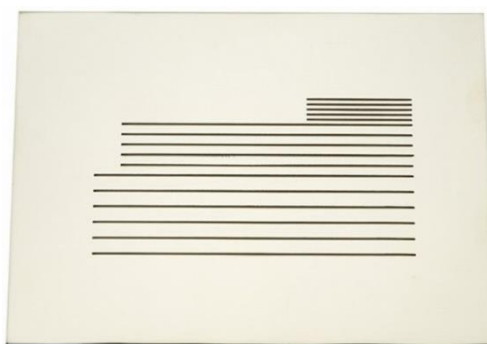


Рисунок 34 - Адгезиметр-решетка «Константа-АР». [41]

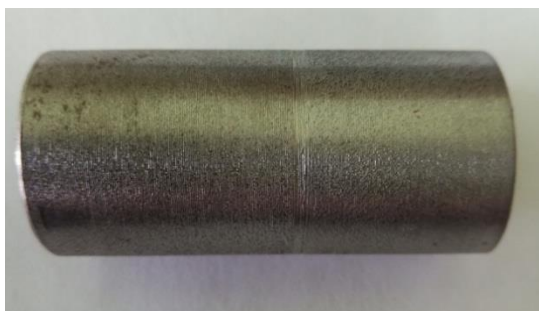


Рисунок 35 - Образец с покрытием и контрообразец (без покрытия), склеенные клеем ВК-51а



Рисунок 36 - Универсальная испытательная машина 200 кН Inspekt-200. [41]

На основании разработанной методики исследования процессов восстановления валов следует сделать следующие выводы:

- Разработанную методику возможно использовать, как универсальную для определения механических и эксплуатационных свойства напыленных покрытий, выполненных разными способами.
- Для выполнения напыления поверхностей вала способами активированной дуговой металлизации, газопламенным и плазменным необходим индивидуальный подбор параметров и режимов напыления, в зависимости от требуемой толщины покрытия и размеров восстанавливаемой детали.

3 Результаты проведенных исследований процессов активированной дуговой металлизации, газопламенного и плазменного напыления антикоррозионных покрытий

3.1 Геометрические параметры напылённых покрытий

В ходе выполнения исследования по напылению антикоррозионных покрытий активированной дуговой металлизацией были определены следующие режимы напыления (табл. 12):

Таблица 12 - Режимы активированной дуговой металлизации антикоррозионных покрытий проволокой 20X13

№ эксперимента	V подачи проволоки, мм/с.	U, В	I, А	P воздуха, МПа	P пропана, МПа
1	6	32	160	0,35	0,3
2	6	32	180	0,35	0,3

Нумерация экспериментов соответствует номерам образцов. Проведенные измерения визуально-измерительного контроля напыленных покрытий определили: геометрические показатели антикоррозионных покрытий (табл. 13). Внешние характеристики напыленных покрытий изображены на рисунках 37, 38.

Таблица 13 - Геометрические показатели антикоррозионных покрытий

№ эксперимента	V перемещения горелки, м/мин.	Кол-во проходов, шт.	δ слоя/проход, мм	δ слоя общая, мм	Дистанция напыления, мм
1	30	6	0,02	0,12	100
2	30	7	0,03	0,21	120



Рисунок 37 - Внешний вид покрытия образца №1



Рисунок 38 - Внешний вид покрытия образца №2

Визуально-измерительный контроль напыленных антикоррозионных покрытий показал, что при проведении активированной дуговой металлизации, на указанных режимах и техники нанесения слоев, покрытия формируются стабильно, равномерно, без видимых дефектов, а также без отклонений от геометрических параметров независимо от изменения режимов и техники нанесения слоев, в ходе проведения экспериментов.

В ходе выполнения исследования по напылению антикоррозионных покрытий плазменным напылением были определены следующие режимы напыления (табл. 14):

Таблица 14 - Режимы плазменного напыления антикоррозионных покрытий порошком $Al_2O_3 + TiO_2$

№ эксперимента	U, В	I, А	Расход Ar, л/мин	Расход H ₂ , л/мин
3	80	600	41	14
4	70	600	41	14

Нумерация экспериментов соответствует номерам образцов. Проведенные измерения визуально-измерительного контроля напыленных покрытий определили: геометрические показатели антикоррозионных покрытий (табл. 15).

Таблица 15 - Геометрические показатели антикоррозионных покрытий

№ эксперимента	V перемещения горелки, м/мин.	Кол-во проходов, шт.	δ слоя/проход, мм	δ слоя общая, мм	Дистанция напыления, мм
3	20	10	0,04	0,4	120
4	20	9	0,06	0,54	110

Визуально-измерительный контроль напыленных антикоррозионных покрытий показал, что при проведении плазменного напыления, на указанных режимах и техники нанесения слоев, покрытия формируются стабильно, равномерно, без видимых дефектов, а также без отклонений от геометрических параметров независимо от изменения режимов и техники нанесения слоев, в ходе проведения экспериментов.

В ходе выполнения исследования по напылению антикоррозионных покрытий газопламенным напылением были определены следующие режимы напыления (табл. 16):

Таблица 16 - Режимы газопламенного напыления антикоррозионных покрытий порошком Metco 18С

№ эксперимента	Регулятор расхода порошка	Подача А, мм/оборот	Сжатый воздух		Р кислород, бар	Р ацетилен, бар
			Горелка, бар	Удлинитель, бар		
5	3	3	2	1	0,7	4
6	3	3	2	1	0,7	4

Нумерация экспериментов соответствует номерам образцов. Проведенные измерения визуально-измерительного контроля напыленных покрытий определили: геометрические показатели антикоррозионных покрытий (табл. 17).

Таблица 17 - Геометрические показатели антикоррозионных покрытий

№ эксперимента	V перемещения горелки, м/мин.	Кол-во проходов, шт.	δ слоя/проход, мм	δ слоя общая, мм	Дистанция напыления, мм
5	20	10	0,06	0,6	150
6	20	14	0,05	0,7	180

Визуально-измерительный контроль напыленных антикоррозионных покрытий показал, что при проведении газопламенного напыления, на указанных режимах и техники нанесения слоев, покрытия формируются стабильно, равномерно, без видимых дефектов, а также без отклонений от геометрических параметров независимо от изменения режимов и техники нанесения слоев, в ходе проведения экспериментов. [48]

3.2 Химический состав напыленных антикоррозионных покрытий

Проведенный химический анализ изготовленных антикоррозионных покрытий определил:

- содержание хрома в структуре покрытий образцов №1 и №2, нанесенных активированной дуговой металлизацией, находилось в интервале от 11,7 до 12,2% от общего объема;
- содержание оксида алюминия в структуре покрытий образцов №3 и №4, нанесенных плазменным напылением, находилось в интервале от 96,7 до 96,9%, оксида титана в интервале от 3,1 до 3,3% от общего объема
- содержание химических элементов в структуре покрытий образцов №5 и №6, нанесенных газопламенным напылением, следующее: кобальт варьируется в интервале от 40,0 до 41,3%, никель в интервале от 25,0 до 25,5%, хром в интервале от 16,1 до 17,2% от общего объема, молибден в интервале от 5,1 до 5,4% от общего объема

На приведенных ниже рисунках 39 – 41 представлены графики распределения химических элементов в антикоррозионном покрытии.



Рисунок 39 - Распределение химических элементов в антикоррозионном покрытии образца №1 и №2

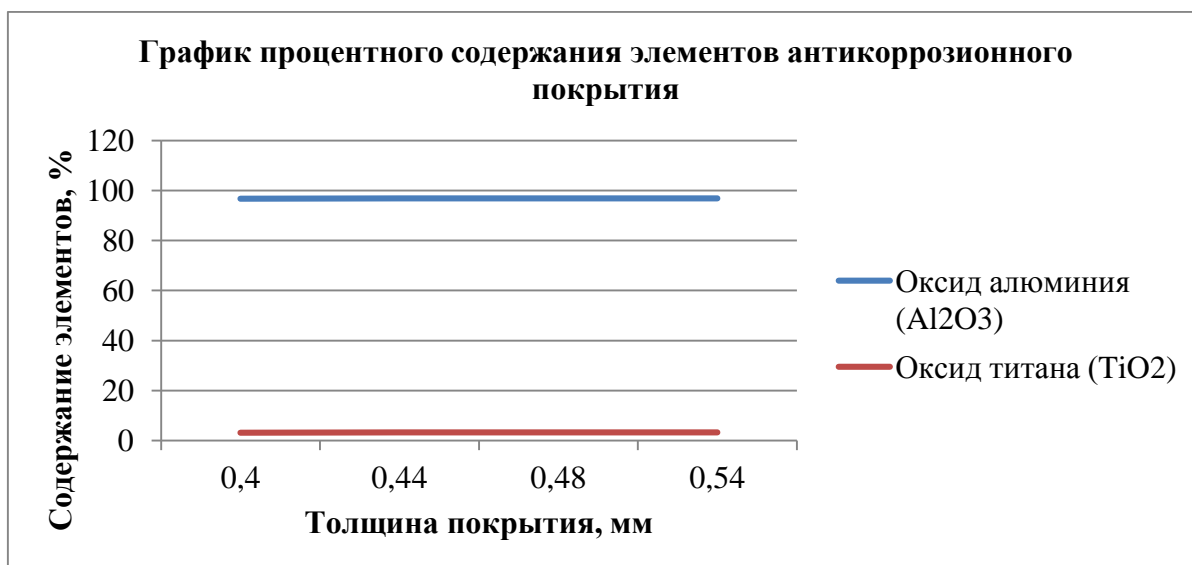


Рисунок 40 - Распределение химических элементов в антикоррозионном покрытии образца №3 и №4

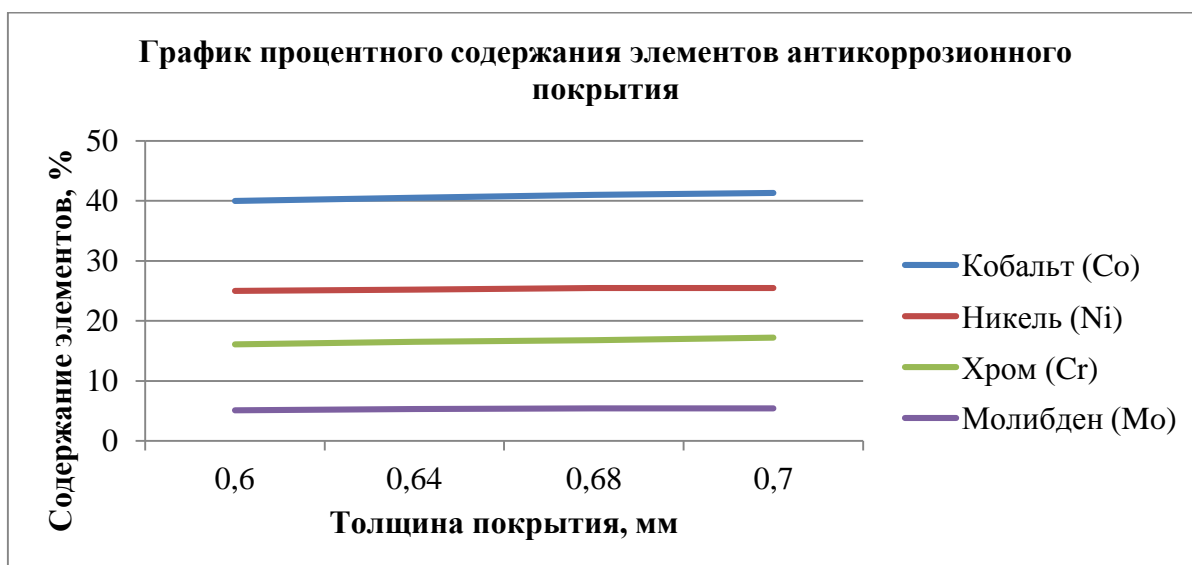


Рисунок 41 - Распределение химических элементов в антикоррозионном покрытии образца №5 и №6

Полученные данные по составу основных элементов напыленных покрытий, показали, что распределение химических элементов по всему напыленному антикоррозионному покрытию однородно.

3.3 Результаты исследования механических и эксплуатационных свойств напыленных антикоррозионных покрытий

3.3.1 Результаты исследования механических свойств антикоррозионных покрытий

Измерения твердости антикоррозионных покрытий, изготовленных методами активированной дуговой металлизации, газопламенного и плазменного напыления, показали следующие результаты микротвердости:

Таблица 18 - Результаты микротвердости антикоррозионных покрытий

№ образца	Шкала твердости по Виккерсу	Значение нагрузки на покрытие (F), Н	Время нагрузки, с	Диагональ отпечатка (d), мм			Числа микротвердости, HV		
				Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 1	Точка 2	Точка 3
1	0,2 HV	1,962	10	0,03	0,03	0,03	412	412	412
2	0,2 HV	1,962	10	0,031	0,031	0,032	386	386	362
3	0,2 HV	1,962	10	0,027	0,027	0,027	508	508	508
4	0,2 HV	1,962	10	0,026	0,026	0,026	548	548	548
5	0,2 HV	1,962	10	0,029	0,028	0,028	440	472	472
6	0,2 HV	1,962	10	0,029	0,028	0,029	440	472	440

Значения микротвердости были определены в трех, произвольно выбранных точках на поверхности покрытий, и рассчитаны по формуле, исходя из требований ГОСТ 9450:

$$HV=k(F/d^2), \text{ где:}$$

HV – значение микротвердости;

k – постоянная величина, равная 0,1891;

F – величина приложенной нагрузки;

d – диагональ отпечатка.

Из полученных значений по микротвердости покрытий можно сделать вывод, что на их величину оказал влияние размер диагонали отпечатка, т.е. чем меньше величина диагонали отпечатка (от 0,026 до 0,032 мм) тем больше

значение числа микротвердости (от 362 HV 0,2 до 548 HV 0,2), что наглядно показано на рисунке 42.

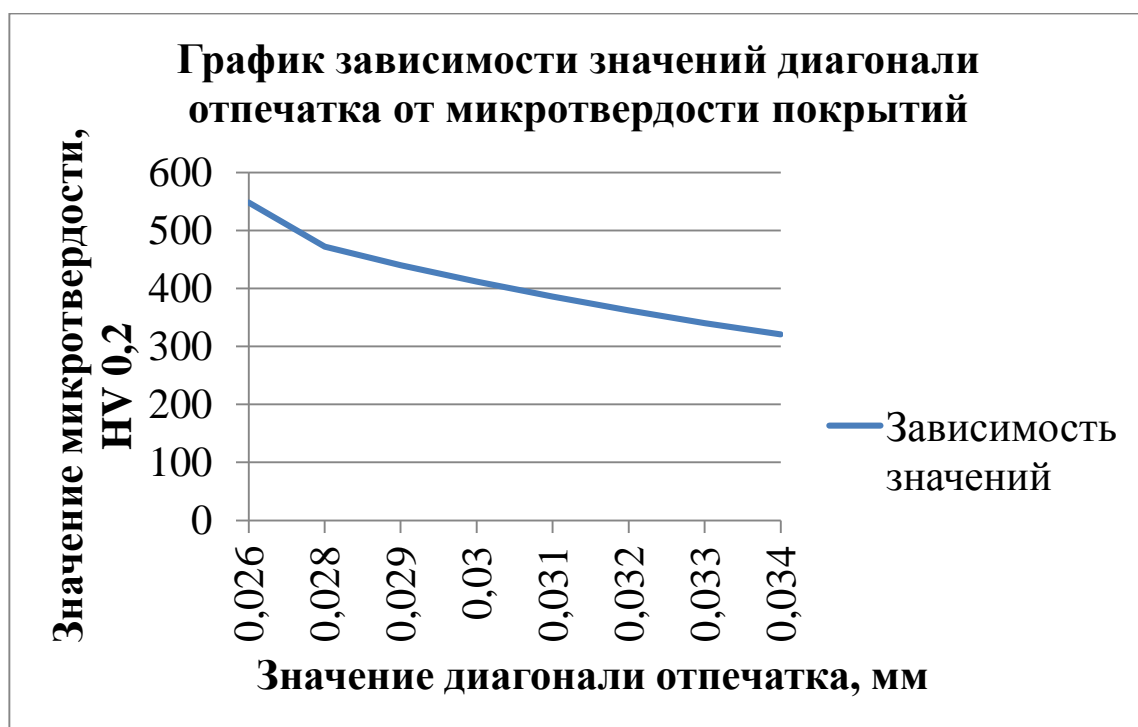


Рисунок 42 - Влияние параметра диагонали отпечатка на величину микротвердости напыленных покрытий образцов

Дополнительно, в ходе исследований твердости покрытия образцов, изготовленного согласно данных таблиц 12-17, было установлено, что на значение микротвердости существенное влияние оказывают режимы напыления, т.е. чем больше значения силы тока и напряжения дуги тем меньше число микротвердости, и чем дальше дистанция между горелкой и напыляемой поверхностью тем меньше число микротвердости и, соответственно, уменьшение режимов напыления и дистанции между горелкой и обрабатываемой поверхностью приводит к увеличению числа микротвердости антикоррозионных покрытий. Наглядно это продемонстрировано следующим образом:

Таблица 19 - Влияние режимов и дистанции напыления на число микротвердости покрытий

№ образца	U, В	I, А	Дистанция напыления, мм	Числа микротвердости, НV		
				Точка 1	Точка 2	Точка 3
1	32	160	100	412	412	412
2	32	180	120	386	386	362
3	80	600	120	508	508	508
4	70	600	110	548	548	548
5	-	-	150	440	472	472
6	-	-	180	440	472	440

3.3.2 Результаты исследования эксплуатационных свойств антикоррозионных покрытий

Исследование открытой пористости покрытий на образцах, в кол-ве 6 шт., из стали 40Х размером 100×100×14 мм, тремя разными способами напыления показали следующие результаты:

Таблица 20 - Результаты открытой пористости

№ образца	Толщина покрытия (δ), мм	m ₀ , гр.	m, гр.	m ₁ , гр.	m ₂ , гр.	ρ _о , г/см ³	ρ _{H₂O} , г/см ³	П _{откр.} , %
1	0,12	1310	1318	1320	1320	7,82	0,998	1,2
2	0,21	1189	1207	1208	1208	7,82	0,998	0,7
3	0,4	1400	1440	1440,3	1440,3	7,82	0,998	0,17
4	0,54	1400	1457	1457,5	1457,2	7,82	0,998	0,11
5	0,6	1300	1356	1356,8	1356,8	7,82	0,998	0,5
6	0,7	1300	1370	1371	1371	7,82	0,998	0,6

Формулой для расчета открытой пористости была:

$$P_{откр.} = ((m_2 - m)\rho_o / (m_2 - m_1)\rho_o - m_0 \times \rho_{H_2O})100, \text{ где:}$$

m₀ – масса образца без покрытия, г.;

m – масса сухого образца с покрытием на воздухе, г.;

m_1 – масса пропитанного образца с покрытием в воде, г.;

m_2 – масса пропитанного образца с покрытием на воздухе, г.;

ρ_0 – плотность материала основы, г/см³;

ρ_{H_2O} – плотность воды, г/см³;

$P_{откр.}$ – открытая пористость.

Анализ исследования открытой пористости, напыленных покрытий 5 экспериментальных образцов, показал, что получившиеся значения открытой пористости полностью соответствуют установленным требованиям оценки качества покрытий согласно ГОСТ 9.304.

Результаты исследования сквозной пористости покрытий на образцах, в кол-ве 6 шт., из стали 40Х размером 100×100×14 мм, тремя разными способами напыления оказались следующими:

Таблица 21 - Результаты сквозной пористости

№ образца	Толщина покрытия (δ), мм	$N_{общ.}$, шт.	S , см ²	$N_{ср.}$, шт.	Пористость, %
1	0,12	12	100	0,12	12
2	0,21	10	100	0,1	10
3	0,4	5	100	0,05	5
4	0,54	3	100	0,03	3
5	0,6	14	100	0,06	14
6	0,7	15	100	0,1	15

Формулой для расчета сквозной пористости была:

$$N_{ср.} = N_{общ.}/S, \text{ где:}$$

$N_{ср.}$ – среднее число пор;

$N_{общ.}$ – общее число пор на контролируемой поверхности;

S – площадь контролируемой поверхности, см².

Для расчета соответствия значений сквозной пористости к площади поверхностей покрытий $N_{ср.} \times 100$, тем самым определялся % соотношения кол-ва пор к площади покрытий образцов.

Результат исследований сквозной пористости, напыленных покрытий 5 экспериментальных образцов, обозначил, что получившиеся значения сквозной пористости полностью соответствуют установленным требованиям оценки качества покрытий согласно ГОСТ 9.304. Внешние характеристики напыленных покрытий образцов, с наличием сквозной пористости, представлены на рисунках 43, 44.

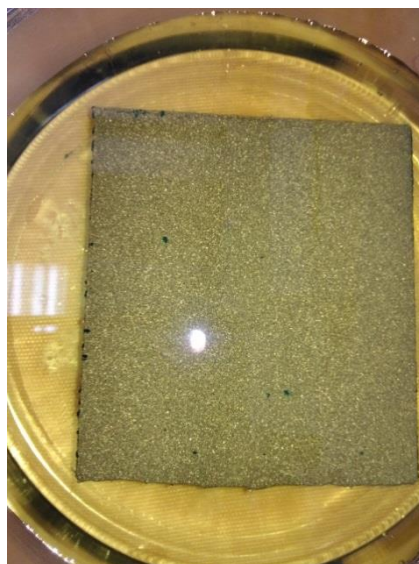


Рисунок 43 - Сквозная пористость покрытия образца №1



Рисунок 44 - Сквозная пористость покрытия образца №2

Таким образом, из результатов исследования открытой и сквозной пористости следует, что значения пористости не превышают величин, установленных требованиями оценки качества антикоррозионных покрытий нормативно-технической документации, т.е. $<20\%$. Наглядно это изображено на рисунке 45, отображающего зависимость уровня пористости покрытия от одного из основных критериев – толщины покрытия.

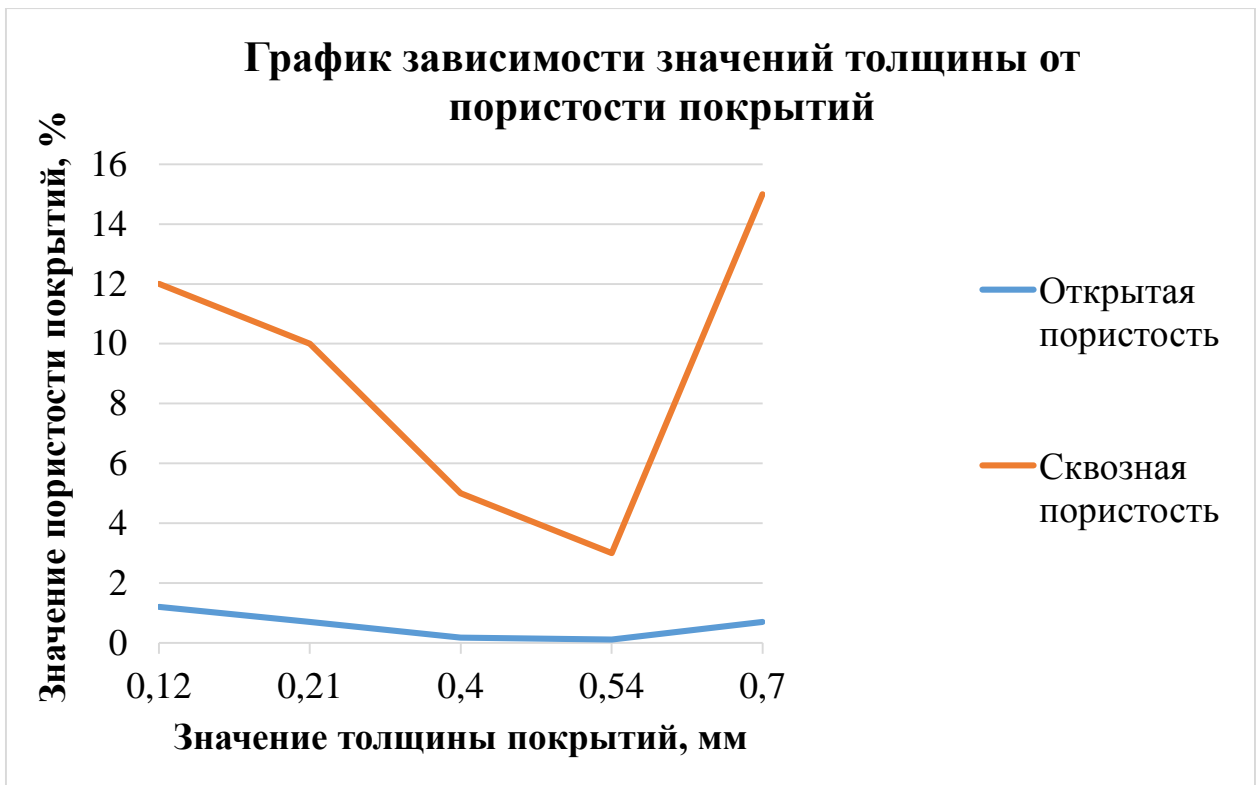


Рисунок 45 - Влияние параметра толщины на величину пористости напыленных покрытий образцов

Результаты исследования адгезионной прочности, на основе метода нанесения сетки царапин на поверхность покрытия образцов, в кол-ве 6 шт., полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ 9.302, т.е. отслаиваний покрытий между линиями и в сетке квадратов не наблюдается. Наглядно это подтверждается следующим образом:



Рисунок 46 - Характеристика внешнего сцепления покрытия образца №1 после нанесения сетки царапин



Рисунок 47 - Характеристика внешняя показаний сцепления покрытия образца №6 после нанесения сетки царапин

Исследования адгезионной прочности покрытия (в т.ч. и клея), на основе метода испытаний на отрыв покрытия толщиной 0,2 мм, нанесенного на торец образцов, склеенных с контрообразцами без покрытия определили следующие результаты (табл. 22 – 24):

Таблица 22 - Результаты адгезионной прочности, на основе метода испытаний на отрыв покрытия выполненного методом активированной дуговой металлизации

№ образца	d, мм	F, Н	S, см ²	Место разрыва склеенных образцов	σ, МПа
1	25	17170	5	По покрытию	35
2	25	17660	5	По покрытию	36
3	25	17700	5	По покрытию	36
4	25	18160	5	По покрытию	37
5	25	17200	5	По покрытию	35
Σ ср.					36

Таблица 23 - Результаты адгезионной прочности, на основе метода испытаний на отрыв покрытия выполненного методом плазменного напыления

№ образца	d, мм	F, Н	S, см ²	Место разрыва склеенных образцов	σ, МПа
1	25	15490	5	По покрытию	31
2	25	15070	5	По покрытию	30
3	25	16190	5	По покрытию	32
4	25	15790	5	По покрытию	31
5	25	14960	5	По покрытию	30
Σ ср.					31

Таблица 24 - Результаты адгезионной прочности, на основе метода испытаний на отрыв покрытия выполненного методом газопламенного напыления

№ образца	d, мм	F, Н	S, см ²	Место разрыва склеенных образцов	σ, МПа
1	25	3440	5	По покрытию	7
2	25	3930	5	По покрытию	8
3	25	3460	5	По покрытию	7
4	25	3980	5	По покрытию	8
5	25	4020	5	По покрытию	8
Σ ср.					8

Прочность сцепления покрытия и клея определяли по формуле:

$$\sigma = F/S, \text{ где}$$

σ – прочность сцепления, МПа;

F – разрывное усилие, Н (кгс/см²);

d – диаметр образцов, мм

S – площадь поперечного сечения образцов, см².

Прочность сцепления покрытия вычисляли как среднее арифметическое результатов 5 испытанных образцов:

$$\Sigma_{\text{ср.}} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5) / 5$$

По итогам получившихся результатов исследования адгезионной прочности образцов, путем равномерного отрыва склеенных образцов с покрытием и контрообразцов без покрытия, можно сообщить:

- значение прочности сцепления покрытия и клея составляет не менее 30 МПа;
- разрыв склеенных образцов происходит в основном по покрытию, что наглядно подтверждается:



1 – образец без покрытия; 2 – образец с покрытием; 3 – образец после испытаний на отрыв

Рисунок 47 - Внешняя характеристика испытанного на отрыв образца

На основании результатов, полученных, в процессе исследования напыления валов, возможно сделать следующие выводы:

- полученные данные по составу основных элементов напыленных покрытий, показали, что распределение химических элементов по всему напыленному антикоррозионному покрытию однородное;
- максимальные значения адгезионной прочности сцепления покрытия были получены, в результате применения метода активированной дуговой металлизации и составили 36 МПа;
- наибольшее значение сквозной пористости покрытия были зафиксированы у метода газопламенного напыления и составили 15%.

Заключение

Проведя полный цикл исследований по определению возможности применения способов газотермического нанесения покрытий в качестве антикоррозионных установили, что применение напыленных, методом активированной дуговой металлизации, покрытий валов из стали 40Х показали наилучшие технико-экономические результаты по сравнению с методом плазменного и газопламенного напыления. В результате применения метода активированной дуговой металлизации была достигнута адгезионная прочность сцепления покрытия 36 Мпа, что значительно превышает показатели плазменного и газопламенного напыления. По сравнению с другими методами у активированной дуговой металлизации наивысшая производительность процесса (10-25 кг/ч), наименьшие затраты на реализацию получения покрытий, а также возможность нанесения покрытий толщиной до 15 мм.

Установлено, что механические и эксплуатационные свойства конструкционной легированной стали 40Х, являющейся основным металлом изделия валов насосного оборудования, не способны в полной мере противостоять влиянию коррозионной среды и поэтому крайне важно обеспечивать антикоррозионную защиту поверхности.

В ходе исследований применялись экспериментальные образцы в виде пластин, размерами 100×100×14 мм и цилиндры диаметром 25×25 мм, высотой 16 мм. Образцы были изготовлены из материала аналогичному изделию вала.

В качестве напыления способом активированной дуговой металлизации использовалась для подслоя сварочная проволока нихром НП Х20Н80 ГОСТ 10543-98 Ø 1,6 мм; для основного коррозионного слоя сварочную проволоку Св-20Х13 ГОСТ 2246-70 Ø 1,6 мм. В качестве напыления способом газопламенного напыления использовался самофлюсующийся порошок марки Metco 18С. В качестве напыления

плазменным способом использовалось для подслоя порошок марки Ni80Cr20 (нихром), для основного защитного слоя порошок марки $Al_2O_3+TiO_2$.

В процессе исследований были определены и опробованы режимы и техника нанесения покрытий активированной дуговой металлизации валов при помощи установки АДМ-10, газопламенного напыления с помощью установки Castodyn DS 8000, плазменного напыления с помощью установки УПУ-8М. Исследования проводились для различного количества проходов и диапазона толщин (слоев) покрытия.

Исследовано и установлено путем внешнего контроля и измерениями, что покрытия формируются стабильно, равномерно, без видимых дефектов, а также без отклонений от геометрических параметров вне зависимости от количества проходов и толщины слоев покрытия, путем выбора соответствующих режимов и техники напыления.

Результат исследования химического состава покрытий показал, что они являются однородными. Однородность говорит практически о полном отсутствии посторонних примесей в сплаве, способных нарушить целостность структуры покрытия.

Исследование твердости покрытий по методу Виккерса установило зависимость микротвердости покрытий от режимов и техники напыления, а рассчитанные значения показали, что твердость покрытий соответствует значениям, установленным требованиями нормативно-технической документации и достигает величины в 548 HV 0,2.

Установлено, что пористость покрытий бывает открытой и сквозной. В ходе исследований было установлено, что толщина покрытий влияет на показатель пористости. Испытания и арифметические расчеты открытой и сквозной пористости показали, что показатель пористости не превышает 20%, что соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Помимо пористости были проведены исследования покрытий на наличие адгезионной прочности (сцепления). Данное свойство проверялось путем

нанесения сетки царапин на поверхность напыленных образцов и испытанием склеенных цилиндров эпоксидным клеем. При нанесении сетки царапин отслоений элементов покрытий не произошло, а при разрыве склеенных образцов, рассчитанный параметр прочности сцепления, показал значения не меньше 30 Мпа только для двух методов напыления – плазменное и активированная дуговая металлизация.

Таким образом, цель данной работы – повышение коррозионной стойкости валов из стали 40Х, в процессе эксплуатации, за счёт нанесения защитных покрытий и разработка технологического процесса нанесения покрытий была достигнута в полном объеме.

Список используемой литературы

1. А. Ф. Ильющенко Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов, В. А. Оковитый, Г. Ф. Громько. - Минск: Беларус. навука, 2011. - 357 с.
2. Авдеенко А.П., Поляков А.Е. Коррозия и защита металлов // Учебное издание. – Краматорск: Издательство ДГМА, 2003. – С. 54 – 57.
3. Акимов Г.В.. Основы учения о коррозии и защите металлов. – М.: Издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1946. – С. 350 – 354.
4. Антошин. Е.В. Газотермическое напыление покрытий. – М.: Издательство «Машиностроение». - 1974. – С. 6 – 90.
5. Бахвалов Г.Т., Турковская А.В.. Коррозия и защита металлов. – М.: Металлургиздат, 1959. – С. 20 – 114.
6. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы // Учебное пособие. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013. – С. 16 – 29.
7. Борисов Ю.С., Кислица А.Н., Войнарович С.Г. Журнал «Автоматическая сварка» / Особенности процесса микроплазменного напыления с использованием проволоочных материалов. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины / № 4, апрель 2006. – С. 26 – 32.
8. Борисов, Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов. - Киев: «Наукова Думка», 1987. - 210 с.
9. ГОСТ 9.302-88. Единая система защиты от коррозии и старения / Покрытия металлические и неметаллические неорганические / Методы контроля. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1990. – С. 2 – 19.
10. ГОСТ 9.304-87. Единая система защиты от коррозии и старения / Покрытия газотермические / Общие требования и методы контроля. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1989. – С. 2 – 9.

11. ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78). Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников (с Изменениями №1, 2). – М.: ИПК Издательство стандартов, 1977. – С. 3 – 32.
12. Дорожкин Н. Н. Получение покрытий методом нанесения порошковых покрытий / Н.Н. Дорожкин, Г.М. Абрамович, В.И. Жарник. - Минск: «Наука и техника», 1985. - 175с.
13. Калачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учеб. для вузов / Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. – 3-е изд. - М.: МИСИС, 1999. – С. 15 – 416.
14. Картонова Л.В., Кечин В.А. Основы материаловедения // Учебное пособие. – Владимир: Издательство ВлГУ, 2014. – С. 50 – 111.
15. Ковтунов А.И. Исследование влияния условий газопламенного напыления на прочность сцепления покрытия с основным металлом / А.И. Ковтунов, Д.А. Семистенов, И.С. Нестеренко, Ю.Ю. Юриков // Журн. «Сварка и Диагностика». - 2018. - №3. - С – 53-57.
16. Козлов Ю.С. Материаловедение. – М.: Издательство «Высшая школа», 1983 – С. 22 – 47.
17. Колисниченко О.В., Тюрин Ю.Н., Товбин Р. Журнал «Автоматическая сварка» / Эффективность процесса напыления покрытий с использованием многокамерного детонационного устройства. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины / № 10, октябрь 2017. – С. 28 – 34.
18. Коржик В.Н., Лютик Н.П., Чайка А.А., Ткачук В.И., Гос И.Д., Никитюк Ю.А. Журнал «Автоматическая сварка» / Сверхзвуковое электродуговое напыление ответственных деталей подвижного состава железнодорожного транспорта. - Гуанчжоу, КНР: Гуандунский институт сварки (Китайско-украинский институт сварки им. Е.О. Патона) / № 9, сентябрь 2016. – С. 20 – 28.
19. Коробов Ю.С. Анализ свойств газотермических покрытий / Часть 2/ Оценка параметров покрытий // Учебное пособие. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. – С. 54 – 63.

20. Котенко Н.П., Котенко А.О. Химическая технология лакокрасочных материалов // Учебно-методическое пособие к практическим занятиям. - Новочеркасск: Издательство ЮРГПУ (НПИ), 2016. – С. 3 – 13.

21. Кравченко И.Н.. Эффективные технологические методы нанесения покрытий газопламенным напылением / И.Н. Кравченко, В.М. Корнеев, А.А. Коломейченко// Вестник Орловский аграрный университет. - 2015. - № 1 С.

22. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов // Учебно-справочное пособие. – С.-Петербург: Издательство Профессия, 2005. – С. 28 – 144.

23. Кудинов В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий [Текст] / В. В. Кудинов, В. М. Иванов. - Москва. : «Машиностроение», 1981. - 192 с.

24. Кудинов В.В. Получение покрытий высокотемпературным распылением / В.В. Кудинов, Л.К. Дружинин. - М.: «МИР», 1973. - 85с.

25. Кушнер В.С. Материаловедение // Учебник. – Омск: Издательство ОмГТУ, 2008. – С. 138 – 152.

26. Лобанов М.Л., Кардонина Н.И., Россина Н.Г., Юровских А.С.. Защитные покрытия // Учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – С. 4 – 200.

27. Лясников В.Н. Плазменное напыление: монография / В.Н. Лясников, А.В. Лясникова, О.А. Дударева. - Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2016. – 643 с.

28. Макиенко Н.И.. Слесарное дело с основами материаловедения /Н.И. Макиенко. - М., «Высш. школа», 1976. - 423с.

29. Мальцева Г.Н. / Под редакцией д.т.н., профессора Виноградова С.Н. Коррозия и защита оборудования от коррозии // Учеб. пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. – С. 120 – 211.

30. Мудрук А.С., Гончаренко П.В.. Коррозия и вопросы конструирования. - Киев: Издательство «Техника», 1984. – С. 57 – 130.

31. Полевой Г.В.. Газопламенная обработка металлов / учеб. пособие / Г. В. Полевой, Г. К. Сухинин. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 336 с.

32. Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. – М.: Машиностроение, 1987. – С. 10 – 192.
33. Смирнов М.А., Окишев К.Ю., Ибрагимов Х.М., Корягин Ю.Д. Материаловедение / Часть 1 // Учебное пособие. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2005. – С. 116 – 125.
34. Спектор Ю.Е., Еромасов Р.Г. Технология нанесения и свойства покрытий. – Красноярск: ФГОУ ВПО «Сибирский Федеральный университет», 2008. – С. 31 – 41.
35. Степанов И.А., Савельева Н.Я., Фиговский О.Л. Анतिकоррозионная служба предприятий // Справочник. – М.: Metallurgy, 1987. – С. 159 – 171.
36. Теплухин Г.Н., Гропянов А.В. Металловедение и термическая обработка // Учебное пособие. – С.-Петербург: Издательство СПбГТУ РП., 2011. – С. 120 – 123.
37. Технология покрытий: каталог. – М: ООО «Мессер Эвтектик Кастолин», 2013. – С. 3 – 60.
38. Федосова Н.Л., Румянцева В.Е., Румянцева К.Е., Балмасов А.В., Чекунова М.Д. «Антикоррозионная защита металлов». – Иваново. 2009. – 187 с.
39. Хаскин В.Ю. Журнал «Автоматическая сварка» / Процессы упрочнения и нанесения покрытий с использованием лазерного излучения (обзор). – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины / № 12, декабрь 2008. – С. 24 – 33.
40. Хокинг М. Металлические и керамические покрытия = Metallic and Ceramic Coatings: Получение, свойства и применение : [монография] / М. Хокинг, В. Васантасри, П. Сидки ; под ред. Р. А. Андриевского ; пер. с англ. Э. М. Лазарева [и др.]. - Москва : Мир, 2000. - 516 с.
41. Шестополова Л.П. Материаловедение: лакокрасочные материалы и покрытия транспортных средств на их основе // Учебно-методическое пособие. - М.: МАДИ, 2018. – С. 5 – 32.

42. Шрайер Л.Л.. Коррозия // Справочник. – М.: Металлургия, 1981. – С. 25 – 330.

43. Aditya Ayyagari, Vahid Hasannaemi, Harpreet Singh Grewal, Harpreet Arora and Sundeep Mukherjee: Corrosion, Erosion and Wear Behavior of Complex Concentrated Alloys: A Review. *Journal Metals*, Vol. 8, August 2018, No. 8, pp. 1-25, 34-36.

44. B. Kalandyk, R. Zapała, S. Sobula, M. Górny, Ł. Boroń: Characteristics of low nickel ferritic-austenitic corrosion resistant cast steel. *Journal Metalurgija*, Vol. 53, April 2014, No. 4, pp. 613-616.

45. Ján Vuřcha: The principles of active anticorrosion protection. *Journal Acta Montanistica Slovaca*. September 2004, No. 3, pp. 332-335.

46. Milena Voderova, Pavel Novák: Protective layers of iron and nickel aluminides on steel. *The Scientific Journal Materials Engineering*, Vol. 20, June 2013, No. 3, pp. 112-117.

47. Mychajło Paszeczko, Krzysztof Dziedzic, Marcin Barszcz: Study of coatings obtained from alloy Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cr. *Advances in Science and Technology Research Journal*, Vol. 10, September 2016, No. 31, pp. 194-197.

48. Yunzhu Shi, Bin Yang, and Peter K. Liaw: Corrosion-Resistant High-Entropy Alloys: A Review. *Journal Metals*, Vol. 7, February 2017, No. 2, pp. 1-3.