

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(институт)

Сварка и обработка материалов давлением и родственные процессы

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

СОМДиРП

В.В. Ельцов

(подпись)

(И.О.Фамилия)

« » 2016г

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Стародубцев Алексей Дмитриевич

(Фамилия, Имя, Отчество студента)

22.04.01. Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических
материалов

(наименование магистерской программы)

Форма обучения Очная

Группа МтМм-1401

Научный руководитель

Д.А. Семистенов

Консультанты

Тема магистерской

диссертации

Формирование износостойких покрытий методом
напыления сжатой дугой

Руководитель магистерской программы

А.И. Ковтунов

(подпись)

(И.О. Фамилия)

« » 2016г.

Тольятти 2016

Аннотация

Целью работы является повышение производительности процессов формирования износостойких покрытий и их качества.

Проведены исследования процессов формирования износостойких покрытий на основе интерметаллидов системы Fe-Al. Разработаны методики исследования процессов формирования, механических и эксплуатационных свойств износостойких покрытий на основе интерметаллидов системы Fe-Al.

Объем пояснительной записки составляет 75 страниц напечатанного текста.

Содержание

Содержание.....	1
Введение.....	5
1. Свойства сплавов на основе системы Fe-Al.....	6
2. Анализ способов формирования износостойких покрытий на основе системы Fe-Al.....	10
2.1. Способы формирования износостойких покрытий на основе системы Fe-Al методом алитирования.....	10
2.1.1. Алитирование методом погружения в расплав.....	10
2.1.2. Алитирование плакирование.....	11
2.1.3. Электролитическое алитирование.....	12
2.1.4. Алитирование в порошкообразных смесях.....	14
2.1.5. Алитирование в вакууме.....	15
2.2. Способы формирования износостойких покрытий на основе системы Fe-Al методом наплавки.....	15
2.2.1. Аргонодуговая наплавка наплавка неплавящимся электродом.....	18
2.2.2. Двухдуговая наплавка.....	20
2.2.3. Наплавка на синергетических режимах.....	22
2.3. Способы формирования износостойких покрытий на основе системы Fe-Al методом напыления.....	22
2.3.1. Метод плазменного напыления.....	26
2.3.2. Метод детонационного напыления.....	27
2.3.3. Газодинамическое напыление.....	28
2.3.4. Напыление сжатой дугой.....	30
2.3.5. Вакуумно-конденсационное напыление.....	31
3. Оборудование для формирования износостойких покрытий.....	33
3.1. Оборудование для аргонодуговой наплавки.....	33
3.2. Оборудование для двухдуговой наплавки.....	36
3.3. Оборудование для наплавки на синергетических режимах.....	38
3.4. Оборудование для напыления сжатой дугой.....	40

4. Методика проведения исследований	44
4.1. Методика измерения геометрических параметров наплавки	44
4.2. Методика исследования химического, структурного и фазового состава сформированного покрытия	44
4.3. Методика исследования износостойкости и жаростойкости сформированного покрытия металла.....	47
4.4. Методика исследований процессов аргонодуговой наплавки.....	49
4.5. Методика исследования процессов двухдуговой наплавки.....	52
4.6. Методика исследования процессов наплавки на синергетических режимах.....	55
4.7. Методика исследования процессов напыления сжатой дугой.....	57
5. Результаты исследований.....	60
5.1. Аргонодуговая наплавка неплавящимся электродом	60
5.2. Двухдуговая наплавка плавящимся электродом в среде аргона	64
5.3. Наплавка на синергетических режимах плавящимся электродом в среде аргона	66
5.4. Напыление сжатой дугой.....	69
Выводы	72
Список используемых источников.....	73

Введение

Конкурентная способность промышленных предприятий во многом связана с межремонтным сроком эксплуатации оборудования, его безаварийностью и надежностью. Увеличение срока службы промышленного оборудования и изделий тяжелого машиностроения является важной задачей для науки и техники в целом, особенно в современных экономических условиях.

Сплавам на основе системы железо-алюминий характерны высокие показатели механических и эксплуатационных свойств, такие как: износостойкость, жаростойкость, коррозионная стойкость и др. Применение таких сплавов в качестве покрытий позволит повысить срок службы элементов промышленного оборудования и изделий тяжелой промышленности, сократить расход дорогостоящих и дефицитных материалов, расширить номенклатуру выпускаемых изделий, а также снизить их массу и себестоимость.

Данные сплавы могут успешно применяться для защиты элементов оборудования, подверженных интенсивному абразивному износу или работающих в условиях повышенных температур и агрессивных сред.

1. Свойства сплавов на основе системы Fe-Al

Железо и алюминий образуют твердые растворы, интерметаллические соединения (химические соединения двух и более металлов, иногда называемые интерметаллидными или просто интерметаллидами) и эвтектику [1, 2].

Согласно диаграмме состояния (рис. 1.1), в сплавах системы железо-алюминий образуются следующие химические соединения: FeAl_3 (59,18% Al), Fe_2Al_7 (62,93% Al), Fe_2Al_5 (54,71% Al), FeAl_2 (49,13% Al), FeAl (32,57% Al) и др.

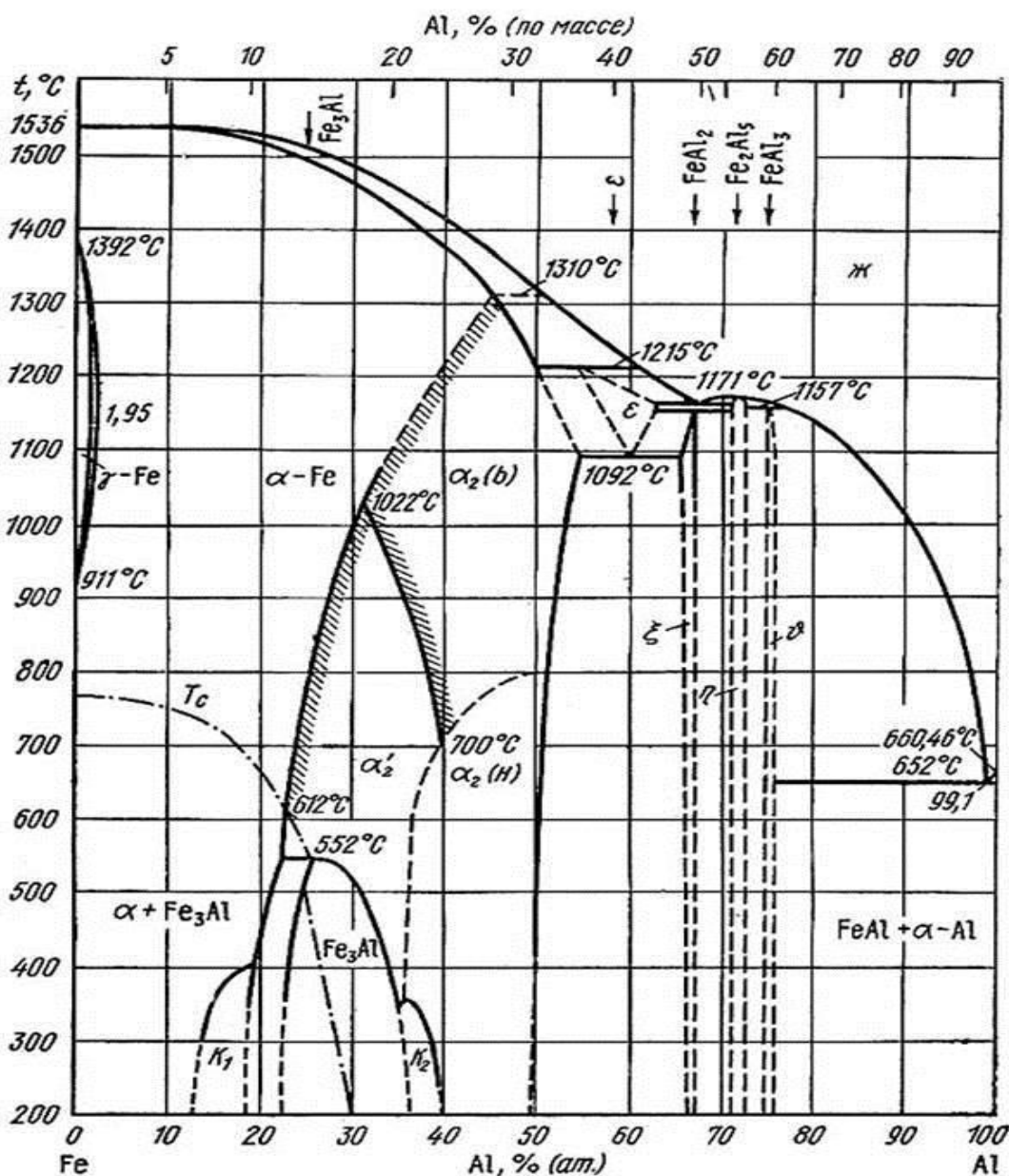


Рисунок 1.1 – Диаграмма состояния железо-алюминий.

Механические и эксплуатационные свойства соединений системы железо-алюминий во многом обуславливаются особенностью кристаллической и электронной структуры. При соотношении валентных электронов и атомов в решетке, равном $3/2$, интерметаллические соединения образуют β -фазы с объемноцентрированной кубической или со сложной кубической структурой. К таким соединениям относится интерметаллид FeAl. Интерметаллические соединения данного типа характеризуются высокой стойкостью к окислению и газовой коррозии, что позволяет применять сплавы на основе этих интерметаллидов в качестве жаростойких материалов и покрытий [3].

Железо, находящееся в алюминии в виде химических соединений, определяет механические и эксплуатационные свойства сплавов системы Fe-Al. Увеличение содержание железа приводит к увеличению твердости и резкому снижению пластичности сплава (рис. 1.2).

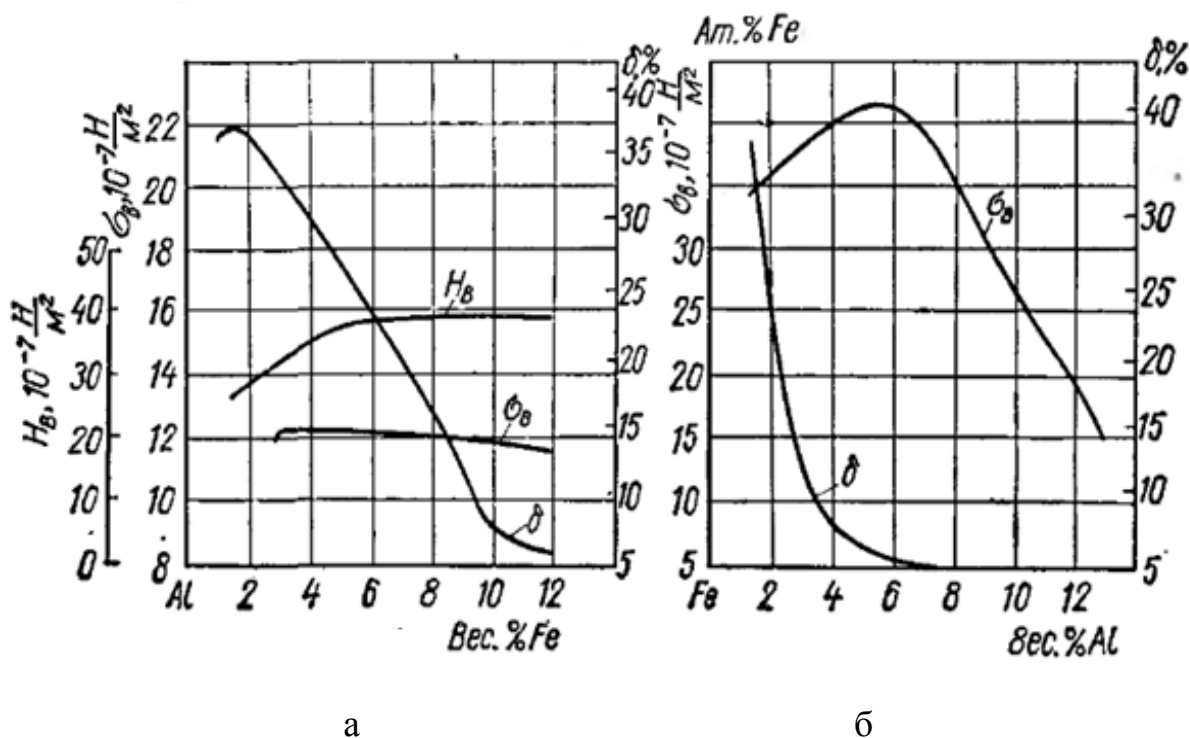


Рисунок 1.2 – Изменение механических свойств (твердость, прочность, пластичность) сплавов системы железо-алюминий в зависимости от содержания железа (а) и алюминия (б).

Сплавы системы железо-алюминий с содержанием железа около 8-10 % обладают малой пластичностью. Дальнейшее увеличение содержания железа резко снижает пластичность, делая такие сплавы достаточно хрупкими [4].

Микротвердость сплавов системы железо-алюминий независимо от их фазового состава, значительно выше, чем у чистого железа или алюминия. Максимальной микротвердостью обладают фазы FeAl_3 ; FeAl_2 ; Fe_2Al_7 ; Fe_2Al_5 . Значение микротвердости для этих фаз колеблется в интервале 960-1150 кгс/мм². Для фазы FeAl значение микротвердости достигает 600 кгс/мм², а для фазы Fe_3Al – 270 кгс/мм². Наибольшей микротвердостью обладает соединение Fe_2Al_5 (1150 кгс/мм²). С увеличением содержания железа твердость всех соединений уменьшается. Высокая твердость некоторых фаз характеризует их высокую абразивную стойкость.

Прочностные свойства этих фаз изменяются практически противоположно твердости. Наибольшей прочностью при растяжении обладают фазы Fe_3Al ; FeAl , а наименьшей - фазы FeAl_3 ; FeAl_2 ; Fe_2Al_7 ; Fe_2Al_5 . Прочность фаз Fe_2Al_7 ; FeAl_3 и Fe_2Al_5 составляет соответственно 1,8, 1,5 и 1,7 кг/мм².

Наименьшей прочностью при сжатии обладает соединение FeAl_3 – 1,6 кг/мм². Фазы FeAl_3 , Fe_2Al_5 , FeAl_2 также значительно хрупки. Наиболее высокой прочностью при сжатии обладают фазы Fe_3Al ; FeAl , Fe_2Al_7 [5].

Следует отметить, что интерметаллидам системы железо-алюминий присущ хрупкий характер разрушения. Хрупкость этих соединений обуславливается особенностями кристаллического строения, наличием ковалентной и ионной связи. Искажение кристаллической решетки при деформации, вызывающее появление полос скольжения, кристаллографически ограничено, что и приводит к хрупкому разрушению.

Для формирования интерметаллидных покрытий целесообразно использовать сплавы на основе фаз Fe_3Al и FeAl , обладающие определенной пластичностью при комнатной температуре. Сплавы на основе данных

соединений отличаются высокой жаростойкостью в серосодержащих средах, а также в солевых растворах сульфатов и хлоридов.

Несмотря на высокие механические и эксплуатационные свойства, сплавы на основе алюминидов железа (интерметаллидов системы железо-алюминий) не находят широкого применения в качестве конструкционного материала. Прежде всего, это связано с их низкой пластичностью и хрупкостью на при комнатной температуре.

Для сплавов на основе FeAl и Fe₂Al применяется дисперсное упрочнение методами порошковой металлургии, обеспечиваемое оксидами.

Наилучшие механические свойства наблюдаются при определенных типах и параметрах микроструктуры. С измельчением зерна происходит повышение прочности и пластичности, затрудняется зернограничное разрушение, создаются условия для сверхпластической деформации, понижается температуры хладноломкости. Мелкозернистая структура обеспечивается кристаллизацией при больших скоростях охлаждения, методами порошковой металлургии и выбором оптимальных условий термомеханической обработки.

2. Анализ способов формирования износостойких покрытий на основе системы Fe-Al

Основная часть технологий создания износостойких покрытий на основе интерметаллидов системы железо-алюминий основывается на процессах смачивания, наплавки и напыления.

2.1. Способы формирования износостойких покрытий на основе системы Fe-Al методом алитирования

Алитирование (или алюминирование) – это процесс насыщения поверхностного слоя атомами алюминия. Поверхность обрабатываемого металла, насыщаясь алюминием, приобретает повышенные эксплуатационные свойства. Наиболее часто алитированию подвергаются детали из малоуглеродистых аустенитных сталей и жаропрочных сплавов [6, 7].

Наибольшую промышленную применимость получили следующие способы алитирования:

- алитирование методом погружения в расплав;
- алитирование плакирования;
- электролитическое алитирование;
- алитирование в порошкообразных смесях;
- алитирование в вакууме.

2.1.1. Алитирование методом погружения в расплав

Сущность данного метода заключается в механическом погружении упрочняемого изделия в ванну с алюминиевым расплавом и последующая выдержка в течение заданного времени (рис. 2.1). Верхний слой металла подвергается растворению в расплаве и вступает с ним во взаимодействие. Реакция взаимодействия и диффузия протекают очень быстро, благодаря чему слой толщиной 0,02-0,10 мм образуется в течение 1-15 мин [8]. Процесс алитирования ведут при температуре 700-800°C.

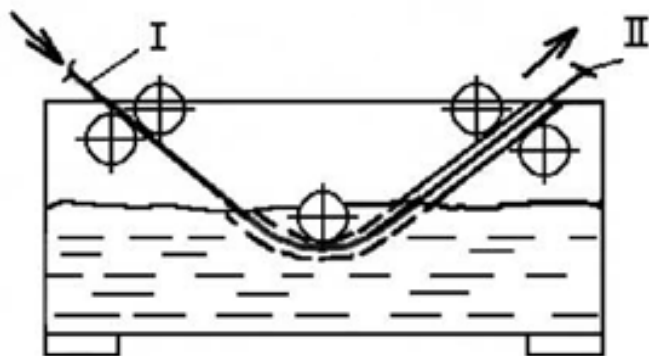


Рисунок 2.1 – Схема метода нанесения покрытий методом погружения: I – Исходный материал; II – материал с покрытием.

Преимуществами данного способа является высокая производительность при использовании агрегатов непрерывного действия (обработка лент, полос, проволоки). Является наиболее дешевым методом, по сравнению с другими способами алюминирования.

К недостаткам следует отнести:

- ограниченность материалов покрытия, связанное с ограничением рабочих температур ванны с расплавленным металлом;
- наличие хрупкой составляющей;
- разъедание погружаемых изделий, так как алюминий в жидком состоянии легко вступает в реакцию с другими металлами;
- налипание алюминия на слои алитирования;
- неравномерность насыщения железа алюминием;
- окисление железа во время погружения;
- налипание пленки окиси алюминия.

2.1.2. Алитирование плакирование

Плакированные материалы представляют собой двух- и многослойные материалы, полученные методом механического соединения.

Важным технологическим параметром при плакировании является температура процесса. При повышении температуры поверхностная энергия и пластичность большинства металлов увеличиваются, а процессы диффузии

протекают более интенсивно, благодаря чему достигается более высокая прочность сцепления [9].

Метод плакирования обеспечивает высокую производительность технологических процессов, высокую адгезию, отсутствует ограничение на толщину соединяемых материалов. Существенным недостатком плакирования является использование его для получения в основном изделий и полуфабрикатов простой формы (рис. 2.2).

Сила сцепления стали и алюминия повышается последующим отжигом.

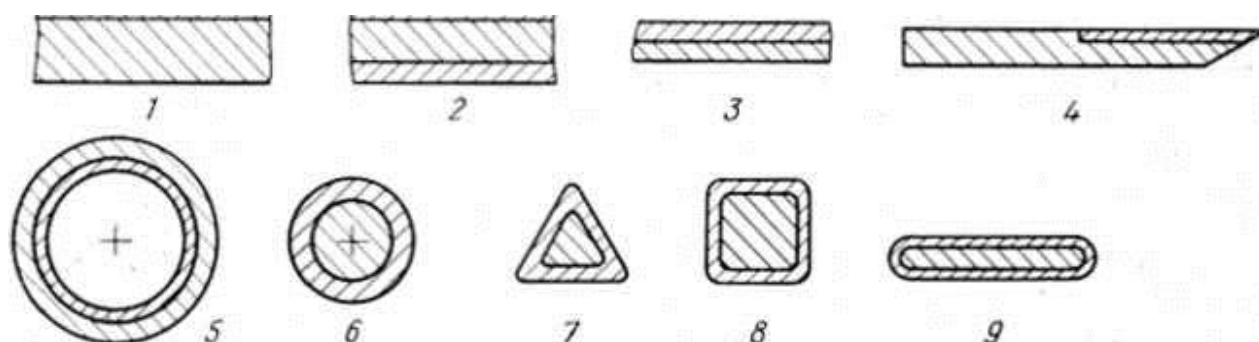


Рисунок 2.2 – Плакированные изделия и полуфабрикаты:

1, 2 – плакированный лист; 3 – биметалл; 4 – ножевой биметалл;
5 – плакированная труба; 6-9 – плакированная прутковая сталь, проволока.

2.1.3. Электролитическое алитирование

Электрохимическое осаждение металлов относится к самым старым способам повышения качества поверхности изделия. Гальванические покрытия нашли широкое применение в промышленности благодаря широкому выбору материала покрытия (практически все металлы) и высокой технологичности процесса.

Принципиальная схема гальванического процесса представлена на рисунке 2.3. В водный раствор соли металла опускают пластину из того же металла и изделие (анод), на которое надо нанести покрытие (катод). При пропускании постоянного электрического тока идет процесс электролиза: пластина растворяется, а на поверхности изделия образуется покрытие.

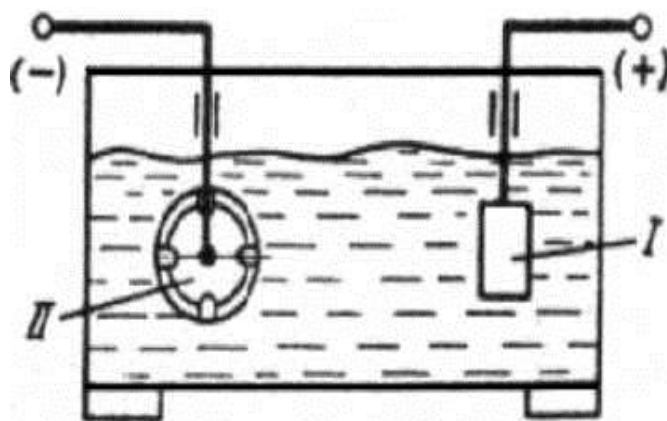


Рисунок 2.3 – Схема нанесения электролитических покрытий:

I – материал покрытия (анод); II – изделие (катод).

Изделие перед покрытием подвергается тщательной очистке, обезжириванию и протравлению в растворе соляной кислоты. Скорость осаждения алюминия незначительна и составляет, ориентировочно, 0,01 мм за 30 мин.

Характеристики процесса и получаемого покрытия при электролизе определяются следующими технологическими параметрами: материал основы, материал покрытия и его электрохимические характеристики, состав электролита, плотность электрического тока, время и температура процесса, форма катода и его положение относительно анода. Эти параметры определяют скорость роста покрытия, его толщину, однородность материала покрытия, вид поверхности - гладкая, матовая или пористость. По описанной выше технологии получают катодные покрытия из чистых металлов или сплавов. Другой разновидностью гальванических покрытий являются анодные покрытия. В данном случае в ванну заливается электролит специального состава (щелочные растворы окислителей), изделие играет роль анода. При пропускании электрического тока у поверхности изделия выделяется кислород, который образует на поверхности изделия прочную защитную пленку из оксидов. Процесс оксидирования нашел широкое применение для защиты поверхности изделий из Al, Zr и др.

Электролит может состоять из 80% $AlCl_3$ и 20% $NaCl$, тогда процесс

ведут при температуре 175 °С.

Преимуществами данного способа:

- широкий выбор исходных материалов;
- высокое качество покрытия (высокая плотность, однородность, химическое чистота);
- низкая температура процесса (сохраняется структура и фазовый состав основного металла).

К недостаткам способа следует отнести небольшую толщину покрытия, низкую скорость образования, наличие токсических веществ в составе электролитов и растворов солей.

2.1.4. Алитирование в порошкообразных смесях

Сущность алитирования в порошкообразных смесях заключается в следующем: подготовленные детали упаковывают в воздухонепроницаемые реторты, барабаны и засыпают алитирующей смесью, состоящей из алюминиевой пудры или порошка и добавок. В состав добавок входят окиси алюминия или молотая глина (для предотвращения спекания) и хлористый аммоний или хлористый алюминий (для защиты изделий и алюминия от окисления).

Температура при котором протекает процесс составляет 900-1080 °С, продолжительность процесса, в зависимости от состава смеси и температуры процесса составляет от 4 до 30 ч.

Такой метод алитирования рекомендуется применять для деталей сложной конфигурации, так как алюминирование в порошкообразных смесях отличается сложностью процесса и его высокой стоимостью.

Недостатками данного способа является:

- высокая температура и длительность процесса;
- высокая трудоемкость и стоимость процесса;

2.1.5. Алитирование в вакууме

Покрытие наносится путем испарения алюминия и осаждении его на изделия. Толщина покрытия составляет десятых долей микрон, а качество покрытия в данном случае выше.

Для алитирования требуются высоковакуумные камеры с давлением 10,3-10,5 мм.рт.ст.. Для нагрева алюминия до 1400 °С применяют электроннолучевые установки. Толщина полученного покрытия пропорциональна длительности испарения алюминия и составляет порядка 0,08-2,5 мкм. При этом способе нанесения алюминия покрытие получается равномерное, без пор, не содержащее железоалюминиевого промежуточного слоя.

Для получения прочного сцепления покрытия с основой, деталь предварительно нагревается до 175 – 370 °С. Процесс требует тщательной подготовки поверхности, так как наличие оксидных пленок существенно влияет на качество сцепления.

Ввиду сложности и высокой стоимости процесса этот вид нанесения покрытия в основном для деталей самого ответственного назначения.

2.2. Способы формирования износостойких покрытий на основе системы Fe-Al методом наплавки

Наплавкой называется технологический процесс нанесения слоя расплавленного металла на оплавленную поверхность детали или изделия. Нанесенный металл после охлаждения прочно связывается с основным металлом, образуя покрытие [10].

Основная цель наплавки - получение рабочей поверхности деталей машин и инструментов с повышенными свойствами, такими как износостойкость, коррозионностойкость и др. В настоящее время в технологии наплавки существует два направления [11]:

- восстановительная наплавка деталей, подвергающихся интенсивному износу;

- изготовительная наплавка для удлинения срока службы деталей.

В основе технологии наплавки лежат те же процессы, что и технологии сварки. При этом из разных способов сварки, имеющих промышленное применение, для наплавки используются методы, обеспечивающие следующие условия:

- неглубокое и равномерное проплавление основного металла;
- образование качественного шва с хорошим внешним видом;
- отсутствие склонности к образованию дефектов;
- высокая технологичность процесса;
- высокая скорость процесса.

Принятая классификация видов и способов сварки применяется и для наплавки. Виды наплавки в зависимости от формы используемой энергии: газовая наплавка (рис. 2.3.а), дуговая наплавка (покрытым электродом, под флюсом, открытой дугой, в среде защитного газа) (рис. 2.3.б), вибродуговая, электрошлаковая, индукционная, плазменная, лазерная, электронно-лучевая. Способы наплавки в зависимости от ведения технологического процесса: ручная, полуавтоматическая, автоматическая.

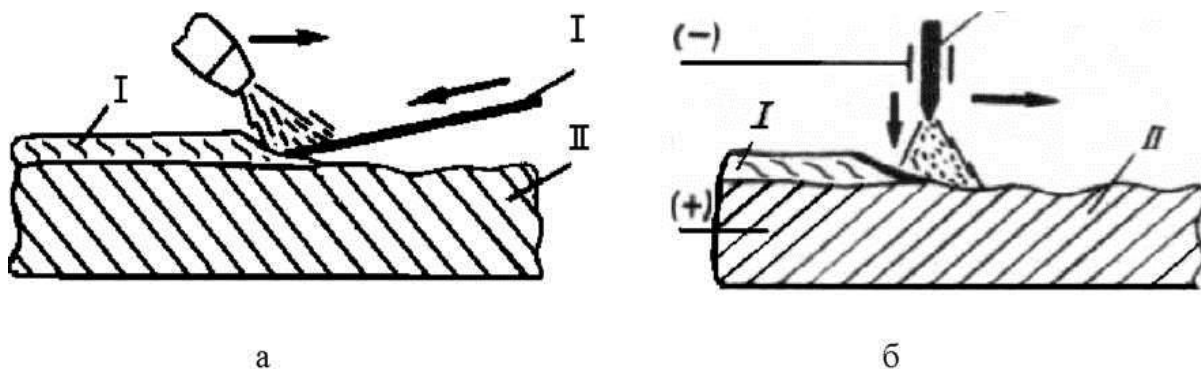


Рисунок 2.3 – Схема электродуговой (а) и газопламенной (б) наплавки:

I – расходный материал, II – изделие.

По сравнению с другими способами обработки поверхности материалов технологии наплавки обладают своими преимуществами и недостатками. Преимущества технологии наплавки.

- возможность нанесения покрытия большой толщины за счет практически неограниченного числа наплавляемых слоев (от 0,25 до 5,0 мм и выше, электрошлаковая наплавка до 450 мм);

- высокая производительность (при использовании ленточных электродов до 15 - 25 кг/час).

- относительная простота конструкции и транспортабельность оборудования, возможность проводить работы в полевых условиях.

Недостатки технологии наплавки связаны с высоким значением погонной энергии, используемой для получения в расплавленном состоянии как материала наплавляемого, так и материала детали:

- ухудшение свойств наплавленного слоя из-за перехода в него элементов основного металла.

- деформация изделия из-за высокого нагрева нагрева.

- ограниченный выбор сочетаний основного и наплавляемого металла из-за образования в ряде случаев (при плохой свариваемости) хрупкой прослойки интерметаллидов на границе покрытие - основа.

- трудность наплавки на поверхность мелких и тонкостенных изделий, а также изделий сложной формы.

Для наплавки износостойких покрытий системы железо-алюминий не выпускаются промышленные наплавочные материалы. Однако в качестве присадочного материала могут успешно применяться присадочные алюминиевые проволоки, которые выпускаются Российской промышленностью в широком ассортименте в соответствии с ГОСТ 7871-75.

В современных экономических условиях наибольшей применимостью обладают способы наплавки в защитных газах и наплавки неплавящимся электродом. Это обусловлено, прежде всего, доступностью и относительно невысокой ценой оборудования для этих процессов.

2.2.1. Аргонодуговая наплавка наплавка неплавящимся электродом

Аргонодуговая наплавка – дуговая наплавка в среде инертного газа аргона. В качестве неплавящегося электрода обычно используется электрод из вольфрама. Аргон практически не вступает в химические взаимодействия с расплавленным металлом и другими газами в зоне горения дуги. Будучи на 38% тяжелее воздуха, аргон вытесняет его из зоны сварки и надежно изолирует сварочную ванну от контакта с атмосферой. При сварке в среде аргона возможен крупнокапельный или струйный перенос электродного металла. При крупнокапельном переносе наблюдается неустойчивость процесса и интенсивное разбрызгивание.

Дуга горит между свариваемым изделием и неплавящимся электродом (обычно из вольфрама). Электрод расположен в горелке, через сопло которой вдувается защитный газ. Присадочный материал подается в зону дуги со стороны и в электрическую цепь не включен (рис. 2.4).

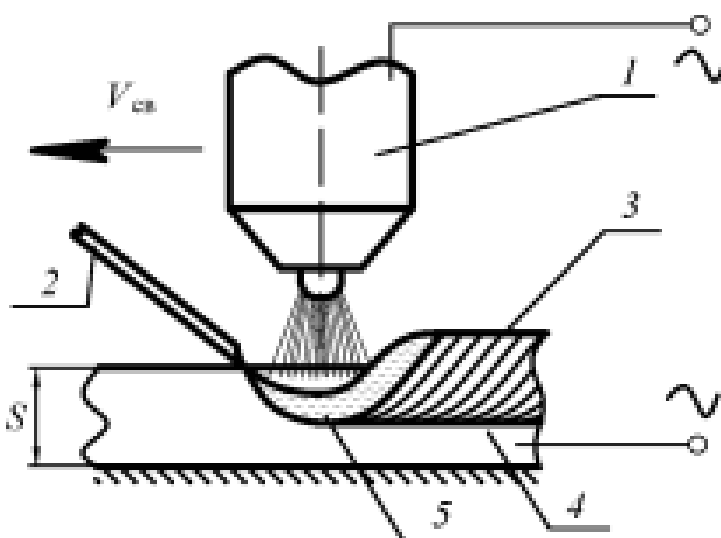


Рисунок 2.4 – Схема аргонодуговой наплавки:

- 1 – сварочная горелка; 2 – присадочный материал; 3 – наплавленный слой;
4 – подложка; 5 – ванна расплавленного металла.

Аргонная наплавка может быть ручной, когда горелка и присадочный пруток находятся в руках сварщика, и автоматической, когда горелка и присадочная проволока перемещаются без непосредственного участия сварщика.

При этом способе наплавки зажигание дуги не может быть выполнено путем касания электродом изделия.

Поэтому при аргонодуговой наплавке неплавящимся электродом для зажигания дуги параллельно источнику питания подключается осциллятор.

Осциллятор для зажигания дуги подает на электрод высокочастотные высоковольтные импульсы, которые ионизируют дуговой промежуток и обеспечивают зажигание дуги после включения сварочного тока. Если аргонодуговая сварка производится на переменном токе, осциллятор после зажигания дуги переходит в режим стабилизатора и подает импульсы на дугу в момент смены полярности, чтобы предотвратить деионизацию дугового промежутка и обеспечить устойчивое горение дуги [12].

Преимущества аргонодуговой наплавки:

- способ наплавки обеспечивает хорошее качество и формирование наплавленных швов;
- позволяет точно поддерживать глубину проплавления металла, что очень важно при наплавке тонкого металла при одностороннем доступе к поверхности изделия.

Недостатки аргонодуговой наплавки:

- неравномерность химического состава наплавленного шва;
- высокое содержание основного металла в наплавленном шве.

2.2.2. Двухдуговая наплавка

Сущность способа наплавки и сварки в защитных газах заключается в том, что дуга горит в струе защитного газа, оттесняющего воздух из зоны сварки и защищающего расплавленный металл от вредного воздействия газов, содержащихся в атмосфере.

В качестве защитного газа используют инертные газы: аргон и азот, не взаимодействующие с расплавленными металлами, а также активные газы и смеси газов: водород, смесь водорода и азота, углекислый газ, смесь аргона и углекислого газа, смесь аргона и кислорода, взаимодействующие в большей или меньшей степени с расплавленным металлом. Защитный газ выбирают в зависимости от свариваемых материалов [13].

При наплавке плавящимся электродом электрическая дуга горит между электродной проволокой, подаваемой в зону сварки, и изделием. Дуга расплавляет электродную проволоку и основной металл (рис. 2.4).

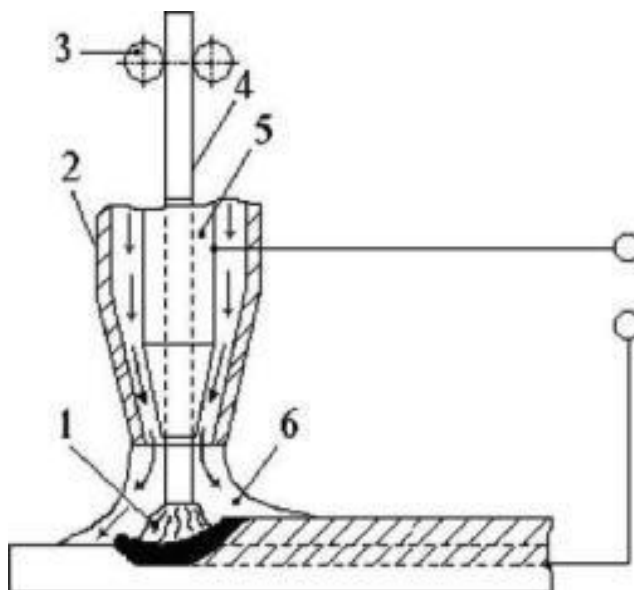


Рисунок 2.4 – Схема дуговой сварки в среде защитных газов:

- 1 – электрическая дуга; 2 – газовое сопло; 3 – подающие ролики;
4 – электродная проволока; 5 – токоподводящий мундштук; 6 – защитный газ.

При двухдуговой автоматической наплавке в среде аргона сущность процесса остается неизменным.

Сварочные горелки (2 ед.) или двухдуговая горелка подключается к разным источникам питания. В ходе процесса наплавки сварочные дуги при малом расстоянии между электродами горят в едином газовом пузыре [14].

Наиболее часто применяется двухдуговая наплавка, при которой наклонены либо обе горелки (рис. 2.5), либо одна наклонена, а другая расположена вертикально. Это позволяет увеличить толщину шва, улучшить его формирование, повысить механические свойства наплавленного валика (за счет снижения скорости остывания) и увеличить скорость наплавки.

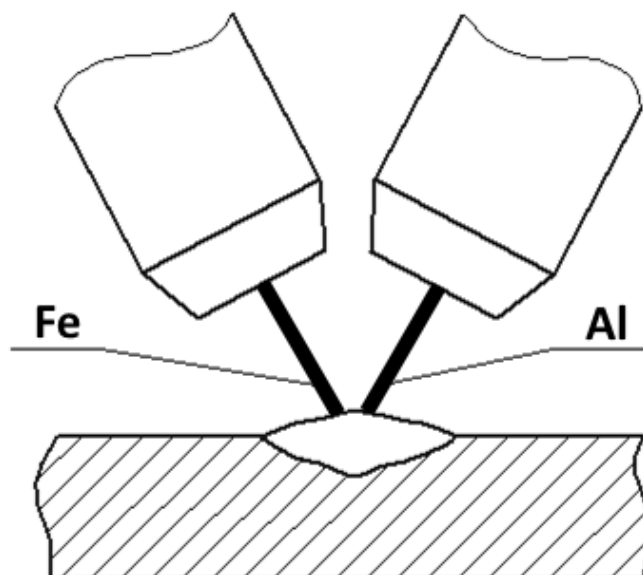


Рисунок 2.5 – Схема двухдуговой наплавки.

Преимущества данного способа:

- возможность стабильного формирования более широкого валика с повышенными механическими свойствами;
- снижение доли содержания основного металла в наплавленном шве;
- возможность создания покрытия с заданным химическим составом.

Недостатком данного способа является увеличение глубины проплавления из-за применения второй сварочной дуги.

2.2.3. Наплавка на синергетических режимах

Синергетическое управление позволяет сосредоточиться исключительно на ведении шва, не требуя применения специальной техники сварки при смене пространственных положений, колебаниях вылета электрода и других изменениях условий сварки. Процесс настройки источника под выполнение конкретной операции заключается в выборе необходимой синергетической программы на панели механизма подачи и задания требуемой скорости подачи проволоки [15].

Используя адаптивное управление, системы с синергетикой поддерживают постоянные условия сварки даже при значительных вылетах электрода при сварке труднодоступных участков шва.

Система в автоматическом режиме оперирует многочисленными переменными сварочного процесса, одновременно подстраивая сам процесс так, чтобы дуга всегда наилучшим образом соответствовала сварке в настоящий момент времени. Даже значительные колебания состава свариваемых материалов, зазора и положения сварочной горелки легко и автоматически компенсируются изменением эпюры сварочного тока.

В качестве способа наплавки был предложен способ механизированной аргонодуговой наплавки алюминиевой электродной проволокой.

Сущность способа остается неизменной: дуга горит в струе защитного газа, оттесняющего воздух из зоны сварки и защищающего расплавленный металл от вредного воздействия газов, содержащихся в атмосфере (рис. 2.4).

2.3. Способы формирования износостойких покрытий на основе системы Fe-Al методом напыления

Среди других методов нанесения покрытий технологии напыления обладают заметным преимуществом. Во-первых, универсальностью выбора материала покрытий: покрытия металлические, полимерные, керамические, композиционные, покрытия из материалов с низкой и высокой температурой плавления, аморфные покрытия. Согласно приведенной выше классификации

все технологии напыления можно разделить на две группы: газотермическое напыление и вакуумно-конденсационное напыление. При этом внутри каждой группы существует целый ряд методов напыления различающихся источником подводимой энергии и физикой протекающих процессов. Особенностью методов газотермического напыления (далее ГТН) является то, что получаемое покрытие формируется из направленного потока дисперсных частиц со средним размером 10-200 мкм (рис. 2.6). Структура материала покрытия формируется при ударе, деформации и затвердевании нагретых частиц на поверхности основы (подложки) или предыдущих остывших частиц. При этом образуется слоистый материал, состоящий из деформированных частиц (сплэтов), соединенных контактными участками [16].

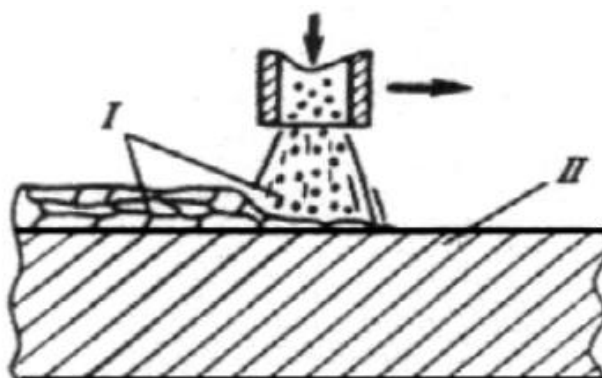


Рисунок 2.6 – Схема нанесения газотермических покрытий:

I – материал покрытия; II – изделие.

В зависимости от источника теплоты и движущих сил переноса различают следующие методы напыления: плазменное, газопламенное, детонационное, дуговая металлизация и высокочастотная металлизация. В первых трех методах источник нагрева совмещен с источником распыления и ускорения частиц. При дуговой и высокочастотной металлизации источники нагрева и ускорения разделены.

Для создания потока частиц используют либо порошки, либо проволоку (стержни). При использовании проволоки поток частиц образуется

посредством расплавления проволоки и ее распыления скоростным потоком автономного газа или самим источником теплоты (плазменной, газопламенной струей).

Процесс газотермического напыления покрытий представляет собой сложную совокупность физикохимических механических явлений. Его можно разделить на два основных этапа: формирование двухфазного потока (газовой струи с дисперсными частицами) и формирование самого покрытия (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Процесс формирования покрытия.

К первому этапу относится процесс взаимодействия высокотемпературного газового потока и частиц, включающий в себя теплообмен и нагрев частиц, их ускорение при передаче количества движения от струи газового потока. На практике желательно получить перегрев напыляемых частиц в момент их подлета к поверхности (на 50 – 100 °С выше температуры плавления материала частиц), с целью повышения прочности сцепления за счет увеличения пятна химического взаимодействия на границе частица подложка.

На втором этапе формируется покрытие при соударении расплавленных частиц с поверхностью основы, в результате чего частицы плотно ложатся друг на друга и, растекаясь, заполняют неровности шероховатой поверхности. Благодаря их высокой температуре в зоне контакта возникают участки схватывания (приваривания), и частицы прочно

соединяются между собой и с основой с образованием сложной структуры покрытия (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 - Схема структуры покрытия:

1 – граница раздела между покрытием и основой; 2 – межслойная граница.

Метод ГТН позволяет получать покрытия с заданной твердостью, износостойкостью, жаропрочностью, антифрикционностью, коррозионной стойкостью. Применять газотермические покрытия выгодно при любых масштабах производства - от индивидуального и малосерийного до высокопроизводительного автоматизированного.

Высокая эффективность и универсальность этого метода определяется следующими особенностями: возможностью нанесения покрытий из различных материалов - чистых металлов, сплавов, оксидов, боридов, карбидов и их сочетанием в различных пропорциях; возможностью получения покрытий на самых различных конструкциях и материалах - на металлах, стеклах, керамике, пластмассах и т.д.; малой деформацией напыляемого изделия; низким расходом материала покрытия, толщина которого составляет 0,1 - 1,0 мм; высокой производительностью (от 1 кг/ч до нескольких десятков кг/ч, в зависимости от способа напыления). Большим достоинством метода ГТН является возможность изменять в процессе напыления состав материала и его структуру от обычной до мелкозернистой

и аморфной, что позволяет регулировать в широких пределах свойства получаемого покрытия.

2.3.1. Метод плазменного напыления

Первые газотермические покрытия были получены методом газопламенного распыления, затем была предложена технология электродуговой металлизации. Возможности ГТН существенно расширились с применением и источников низкотемпературной плазмы. Плазменное напыление резко повысило качество покрытий, поскольку появилась возможность в широких пределах управлять энергетикой процесса (рабочая температура плазменной струи от 5000 до 15000°K) и создавать покрытия практически из любых материалов, в том числе и из композиционных материалов, которые не могут быть получены другими методами [17].

Потребность в материалах с очень высокими эксплуатационными характеристиками появилась и непрерывно растет в связи с развитием новых отраслей техники, для которых характерно быстрое увеличение рабочих нагрузок, температур, агрессивности рабочих сред. Метод плазменного напыления позволяет получать покрытия отвечающие указанным требованиям. Так, для изготовления легких конструкционных деталей, работающих при высоких температурах, были предложены композиционные материалы с металлической матрицей (Al, Mg, Ti и другие легкие металлы и сплавы) армированные волокнами короткими, непрерывными или в виде нитевидных кристаллов (B, C, SiC, Al₂O₃, W). Повысить качество получаемых композиционных материалов возможно в сочетании технологии напыления с последующим горячим прессованием, прокаткой или пропиткой жидкими металлами или полимерами.

Плазменные покрытия обладают высокой плотностью и хорошим сцеплением с основой. К недостаткам метода можно отнести - сравнительно низкую производительность процесса напыления, шум при работе, интенсивное ультрафиолетовое излучение [18].

2.3.2. Метод детонационного напыления

Особые условия формирования покрытий имеют место при детонационно-газовом напылении покрытий. В этом методе используют специфический способ нагрева и распыления и ускорения напыляемых частиц.

Источник представляет собой высокоскоростной поток газовой смеси, образующейся в результате направленного взрыва, обусловленного детонацией. Детонация представляет собой процесс химического превращения взрывчатого вещества при распространении по нему детонационной волны с максимально возможной скоростью, превышающей скорость звука в данной среде [19].

Детонационная волна образуется в камере водоохлаждаемого ствола установки (детонационной пушки), в которую одновременно с рабочей газовой смесью подается порошок напыляемого материала. Скорость продуктов детонации определяет скорость напыляемых частиц. Обычно это высокие скорости, достигающие значений 800 - 1200 м/с. При такой скорости частицы в момент столкновения с поверхностью подложки могут разогреваться до 4000°С и выше. Высокая скорость движения частиц и их разогрев при детонационном напылении обеспечивает получение покрытий высокой плотности и прочности сцепления с основой. При этом температура основного материала остается низкой, исключая его деформацию или иное физическое изменение, что позволяет использовать этот способ напыления для прецизионных деталей и для получения покрытий с высокой адгезией.

К недостаткам метода можно отнести низкую производительность метода - за один "выстрел" получается покрытие толщиной ~ 6 мкм (производительность установки 4 - 5 "выстрела" в секунду, рабочая толщина покрытия 0,25 - 0,3 мм). Из-за большого шума (до 140 дБ) оборудование для детонационного напыления приходится устанавливать в камере со

звукоизолирующими стенами. Недостатком данного метода также является высокая стоимость оборудования [20].

2.3.3. Газодинамическое напыление

Сущность традиционных газотермических методов нанесения покрытий заключается в необходимости нагрева дисперсного материала до температуры плавления или выше. Ускорения и переноса его до напыляемой поверхности высокотемпературными струями. В результате происходят сложные физикохимические процессы, включающие в себя реакции окисления, выгорания мелкодисперсных порошков, разложенные ряда материалов. Таким образом, наряду с позитивными процессами в этом случаи реализуется и негативные, связанные с использованием высокотемпературных потоков газа или плазмы. К настоящему времени предложены и реализуются подходы, позволяющие уменьшить влияние негативных факторов на физико-технические характеристики покрытий и связанные в основном с оптимизацией процессов газотермического напыления.

Метод «холодного» газодинамического напыления (ХГН) позволяет решить эту важную проблему принципиально иным путем, используя в качестве основной не тепловую, а кинетическую энергию напыляемых частиц, ускоряемых холодным газом, и тем самым нивелировать негативные высокотемпературные эффекты.

Сущностью технологии ХГН заключается в том, что покрытия формируются из нерасплавленных высокоскоростных частиц размером 50-0,01 мкм, ускоряемых в сверхзвуковых аэродинамических установках до скорости 1000 м/с и более, при температуре рабочего газа существенно ниже температуры плавления материала частиц [21].

Следовательно, отличительна особенность технологии ХГН (в сравнении с плазменной, газоплазменной, детонационной) состоит в том, что основным энергетическим источником формирования покрытий является

кинетическая энергия напыляемых частиц, сообщаемая им сверхзвуковым потоком рабочего газа, что обеспечивает получение покрытий с минимальными температурными напряжениями без сквозных пор и микротрещин и обуславливает высокие электропроводящие, антикоррозийные и прочностные (адгезионно-когезионные) свойства.

Отличительной особенностью метода ХГН является возможность получения покрытий при температуре струи 0-500 °С, меньшей температуры плавления материала частиц. В связи с этим отсутствуют эффекты высокотемпературного окисления, испарения, плавления, кристаллизации, газовыделения и т.д., характерные для газотермических методов.

К преимуществам метода относятся:

- возможность использования порошков с размером менее 30-50 мкм, в том числе ультрадисперсных, что приводит к улучшению качества покрытия: увеличивается его плотность, уменьшается объем микропустот;

- отсутствие существенного нагрева частиц и связанных с ним процессов высокотемпературного окисления, фазовых переходов, что позволяет получать покрытия со свойствами, близких к свойствам материала исходных частиц, а также композиционные покрытия из механической смеси порошков, значительно различающихся по физико-термическим свойствам;

- отсутствие существенного термического воздействия на обрабатываемое изделие, что позволяет наносить покрытия на подложке из нетермостойких материалов и тонкостенных изделий;

- простота технической реализации и улучшение безопасности работ в связи с отсутствием высокотемпературных струй.

Недостатком газодинамического напыления является:

- возможность нанесения покрытий только из относительно пластичных металлов, таких как медь, алюминий, цинк, никель и др;

- не позволяет напылять чистые порошки пластичных металлов из-за недостаточной скорости частиц.

- для компенсации небольшой кинетической энергии частиц,

используются смеси порошков пластичных металлов и абразива (корунда). При этом частицы абразива выполняют три функции: придают смеси с мелким порошком металла хорошую сыпучесть, активируют (пескоструят) напыляемую поверхность непосредственно в процессе напыления и "вбивают" частицы металла в эту поверхность, сообщая им дополнительную энергию. Получается, что "платой" за недостаток скорости частиц является наличие абразива в готовом покрытии и медленное образование покрытия [22, 23, 24, 25, 26].

2.3.4. Напыление сжатой дугой

Сущность напыления сжатой дугой заключается в том, что в сжатую газовую струю подаётся распыляемый материал, который нагревается, плавится и в виде потока направляется на подложку. Вдуваемый в камеру газ, сжимает столб дуги в канале сопла плазматрона и, охлаждая его поверхностные слои, повышает температуру столба. При ударе и деформации происходит взаимодействие частиц с поверхностью основы или напыляемым материалом и формирование покрытия.

Данный способ позволяет осуществлять напыление металлических, керамических и композиционных порошковых покрытий толщиной до 1-2 мм при температуре нагрева изделия менее 150 °С, исключая его деформацию и структурные изменения металла основы с использованием воздушных плазменных струй.

Преимуществом данного способа является:

- возможность применения широкого спектра напыляемых материалов;
- широкие пределы регулирования режимов дают возможность производить процесс при незначительном нагреве металла изделия (≤ 150 °С), так и при значительном нагреве и последующем переплавлении сформированных слоев;
- возможность напыления покрытий на малогабаритные изделия и листовые конструкции.

2.3.5. Вакуумно-конденсационное напыление

Вакуумное конденсационное напыление (осаждение) (ВКН). Покрытие формируется из потока частиц, находящихся в атомарном, молекулярном или их ионизированном состоянии. Обобщенная схема процесса показана на рис. 2.9.

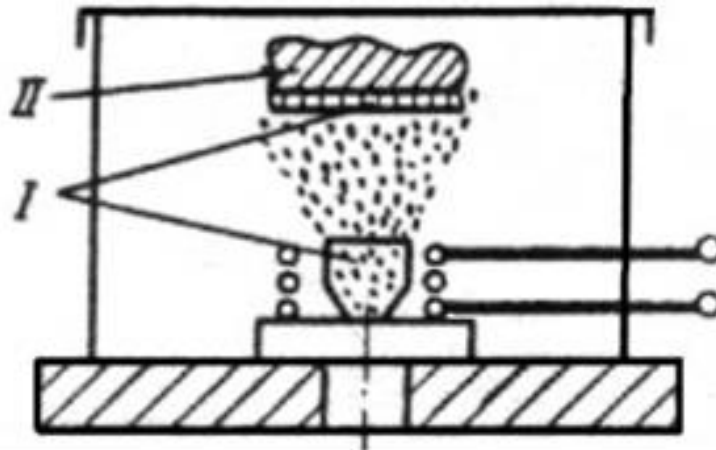


Рисунок 2.9 – Схема метода вакуумного конденсационного напыления покрытий: I – материал; II – изделие.

Соответственно этому вакуумное конденсационное напыление разделяют на методы. При ионизации потока напыляемых частиц реализуется способ ионно-плазменного напыления, а при введении в поток реактивного газа - вакуумное конденсационное напыление.

Процесс ВКН состоит из трех стадий: переход конденсированной фазы в газообразную, формирование потока и перенос частиц на поверхность изделия, конденсация паров на поверхности напыления и образование покрытия. Для получения покрытий с высоким качеством требуется строго соблюдать оптимальные режимы протекания процессов на каждой из трех стадий.

Вакуумное конденсационное напыление нашло широкое применения в различных областях техники. К преимуществам ВКН относятся высокие физико-механические свойства покрытий, возможность получения покрытий из синтезированных соединений (карбидов, оксидов, нитридов и др.),

получение тонких и равномерных покрытий. В отличие от химических и электролитических методов получения тонких покрытий технология ВКН является экологически чистой. Возможности методов вакуумного конденсационного напыления позволяют получать покрытия толщиной от десятков нанометров до сотен микрометров из различных материалов с высоким качеством. Среди недостатков методов вакуумного напыления следует отметить низкую производительность процесса (скорость напыления около 1 мкм/мин), повышенную сложность технологии и оборудования (связанные с вакуумной системой), невысокие показатели энергетических коэффициентов распыления и напыления [27].

Цели и задачи работы:

На основе анализа состояния вопроса и способов формирования износостойких покрытий, была сформулирована цель работы, а именно: повышение производительности процессов формирования износостойких покрытий и их качества.

Для достижения этой цели были поставлены задачи:

- 1) Разработать методику исследования процессов формирования износостойких покрытий.
- 2) Разработать и изготовить оборудование и оснастку для исследования процессов формирования износостойких покрытий.
- 3) Исследовать процессы формирования износостойких покрытий.
- 4) Исследовать механические и эксплуатационные свойства сформированных покрытий.

3. Оборудование для формирования износостойких покрытий

Подбор оборудования для формирования износостойких покрытий производился с учетом современных экономических условий, а также с учетом уже имеющегося оборудования на базе ТГУ и ООО «ССДЦ «Дельта».

3.1. Оборудование для аргонодуговой наплавки

Для аргонодуговой наплавки неплавящимся электродом в качестве источника питания использовали универсальный сварочный источник Migatronic BDH 550 (рис. 3.1) и специально сконструированной установки, состоящей из рамы с наплавляющими рельсами; механизма позиционирования; оборудования для подачи присадочной проволоки и источника питания (рис. 3.2).



Рисунок 3.1 – Универсальный сварочный источник Migatronic BDH 550.

Технические характеристики источника питания представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики Migatronic BDH 550 [28].

Параметр	Значение
Напряжение питающей сети, В	380
Пределы регулирования сварочного	5-550

тока, А	
Внешний вид ВАХ	Падающая
Скорость подачи электродной проволоки, м/час	10-932
Расход защитного газа, л/мин	5-30
Габаритные размеры, мм	670x460x800
Масса, кг	135

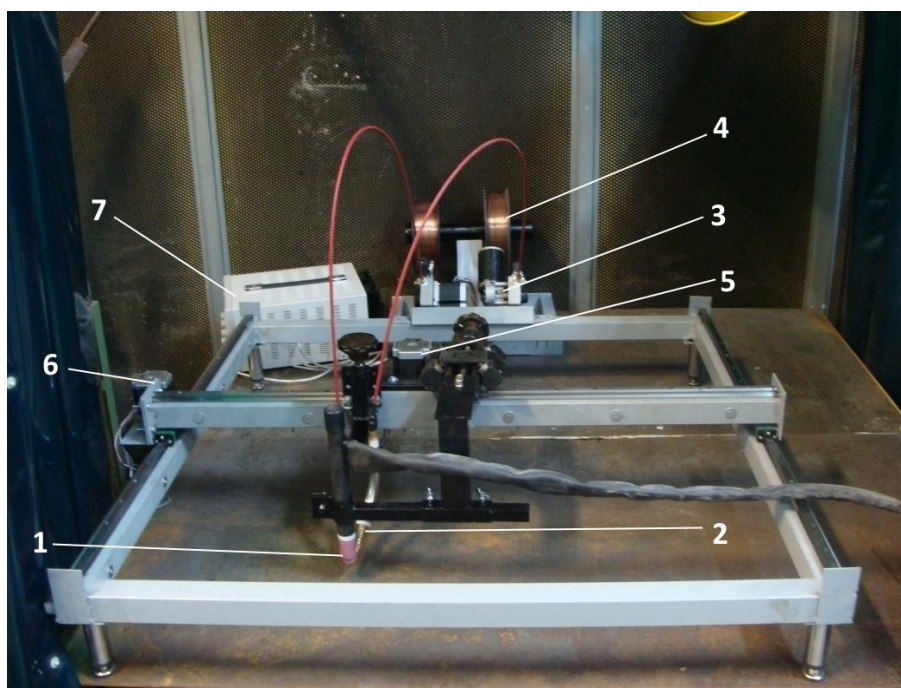


Рисунок 3.2 – Установка для автоматической аргодуговой наплавки неплавящимся электродом: 1 – горелка для сварки неплавящимся электродом; 2 – мундштук для подачи присадочной проволоки; 3 – Механизм подачи присадочной проволоки; 4 – Бухта с алюминиевой присадочной проволокой, закрепленная на станине; 5 – Шаговый двигатель для перемещения по оси X; 6 – Шаговый двигатель для перемещения по оси Y; 7 – блок управления.

Рама установки размером 1000x1000 мм выполнена из трубы квадратного сечения 40x40. Две наплавляющие серии НГ длиной 1000мм установлены на верхней поверхности оси Y. На каретки наплавляющих

установленная ось X, состоящая из квадратной трубы длиной 1000мм, идентичной наплавляющей и двух кареток.

Оборудование для подачи присадочной состоит из подающего механизма с двигателем постоянного тока типа 45402BVE фирмы TVi Industries GmbH. Применение подающего механизма с шаговым двигателем позволяет снизить стабильную минимальную скорость подающего механизма до 0 и работать в диапазоне скоростей подачи 0-5 м/мин.

Передвижение по осям осуществляется шаговыми двигателями при зацеплении зубчатой рейки, установленной на оси и зубчатой шестерни, установленной на валу двигателя.

Управление шаговыми двигателями осуществляется специализированными приводами, собранными в едином блоке управления, состоящем из программируемого контроллера SMC-3; программируемого блока управления SMSD-3.0 и блока питания.

Механизм позиционирования предназначен для обеспечения качества процесса наплавки путем изменения геометрии ввода подающих проволок в место сварки и позволяет регулировать длину дуги; угол ввода присадочной проволоки; высоту ввода присадочной проволоки; расстояние от мундштука до сварочной дуги.

Для наплавки использовали сварочную горелку AUT-TIG 400W фирмы Abicor-Bensel.

3.2. Оборудование для двухдуговой наплавки

Для двухдуговой автоматической наплавки в среде защитных газов применялись два универсальных источника питания Migatronik BDH 550 (рис. 3.1) и специально сконструированная экспериментальная установка для двухдуговой наплавки (рис. 3.3), состоящая из рамы с наплавляющими рельсами; подвижного портала с закрепленными на нем двумя горелками с механизмами регулирования. Данная установка обеспечивает возможность осуществления двухдуговой наплавки в автоматическом режиме.

Рама установки размером 800x350 мм крепится перпендикулярно стене специальными кронштейнами. На раме закреплена направляющая серии НГ длиной 700 мм.

Передвижение портала осуществляется шаговым двигателем при зацеплении зубчатой рейки, установленной на оси и зубчатой шестерни, установленной на валу двигателя.

Управление шаговыми двигателями осуществляется специализированными приводами, собранными в едином блоке управления, состоящем из программируемого контроллера SMC-3; программируемого блока управления SMSD-3.0 и блока питания.

Технические характеристики источника питания приведены в таблице 3.1.

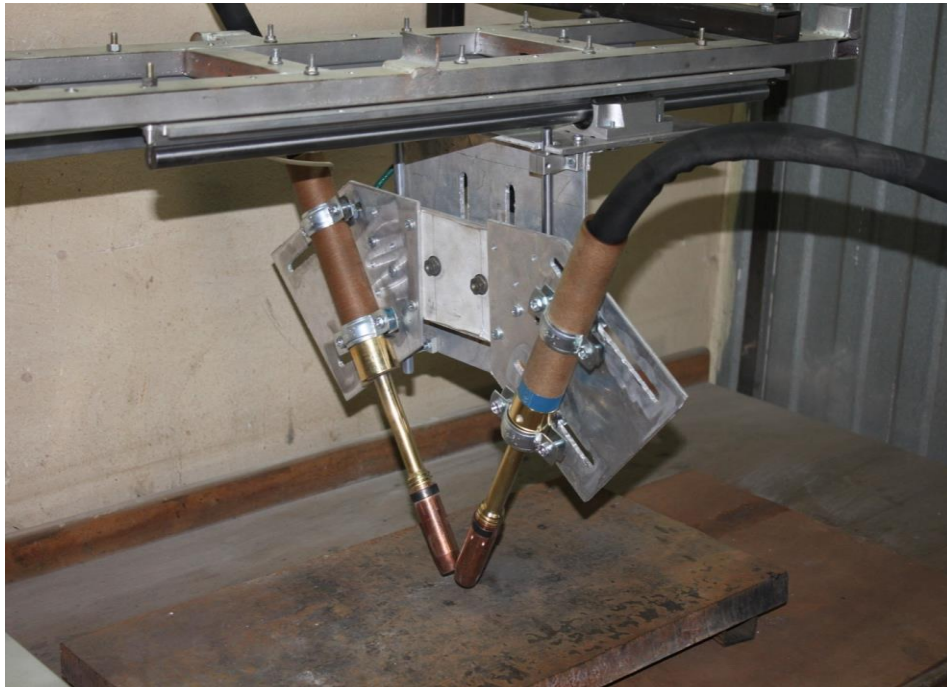


Рисунок 3.3 – Установка для автоматической двухдуговой наплавки.

Механизм позиционирования предназначен для обеспечения качества процесса наплавки путем изменения геометрии ввода электродных проволок в место сварки и позволяет регулировать вылет электрода; угол ввода присадочных проволок; расстояние между дугами.

Для наплавки использовали сварочную горелку ТВІ (2 ед).

Для регулировки положения сварочных горелок применяли механизм, состоящий из специализированного исполнительного механизма линейного перемещения с низким люфтом передвижения. Его рабочий ход составляет 100 мм. К данному механизму крепится пластина с пазами для перемещения хомутов для закрепления горелок, с помощью которой осуществляется регулировка положения горелок (рис. 3.4).

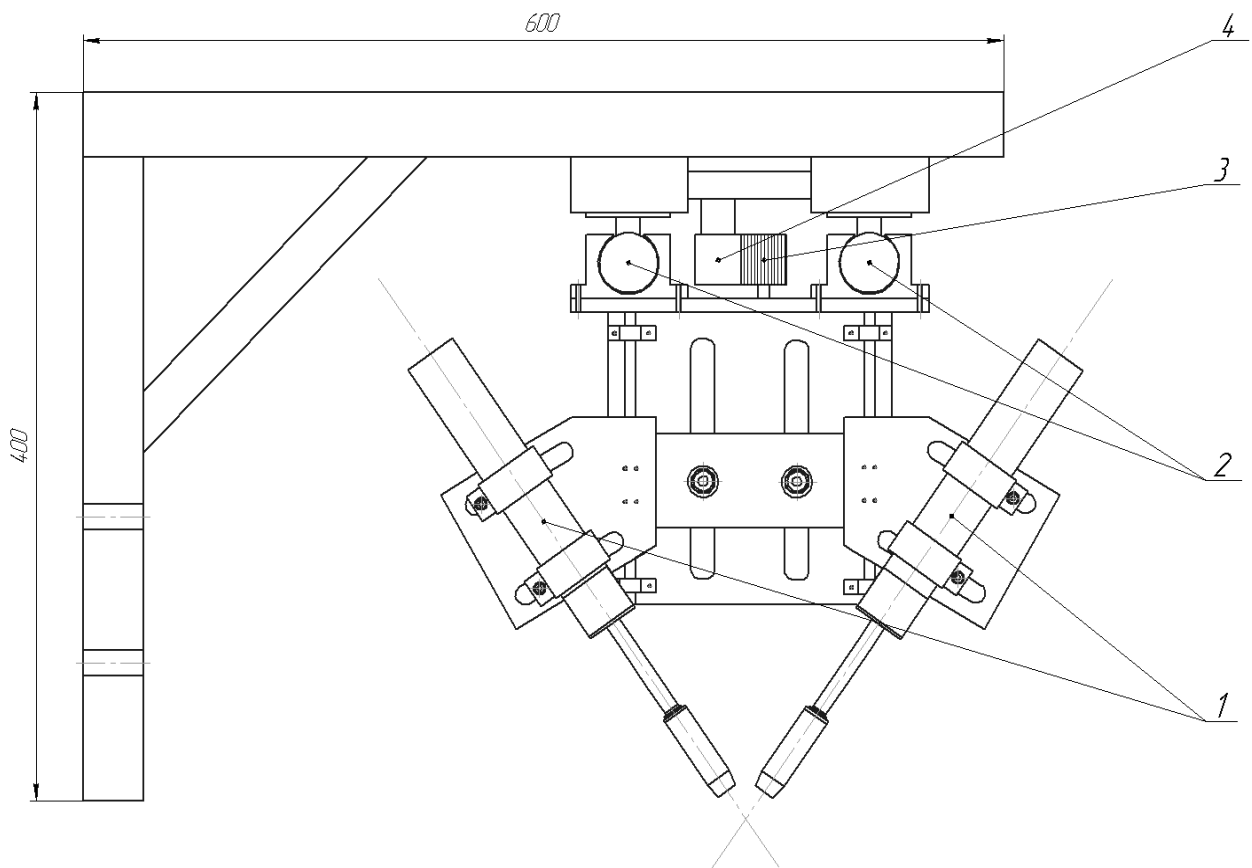


Рисунок 3.4 – Схема установки для наплавки:

- 1 – вертикальные горелки; 2 – направляющие; 3 – зубчатая шестерня;
4 – зубчатая рейка

3.3. Оборудование для наплавки на синергетических режимах

Для механизированной аргодуговой наплавки алюминиевой электродной проволокой на синергетических режимах применялось оборудование фирмы Керрри, а именно источник питания Керрри KMS 500 с функцией синергетического управления режимами (рис. 3.5) и механизм подачи проволоки Керрри MXF 65 (рис. 3.6).

Технические характеристики источника питания Керрри KMS 500 представлены в таблице 3.2. Технические характеристики механизма подачи представлены в таблице 3.3 [29].



Рисунок 3.5 – Источник питания Кемпрі КМС 500.



Рисунок 3.6 – Подающий механизм Кемпрі МХФ 65.

Таблица 3.2 – Технические характеристики Кемпрі КМС 500.

Параметр	Значение
Напряжение питающей сети, В	380
Пределы регулирования сварочного тока, А	10-500
Пределы регулирования напряжения, В	10-40
Внешний вид ВАХ	Жесткая
Габаритные размеры, мм	590x230x430
Масса, кг	35

Таблица 3.3 – Технические характеристики Kemppi MXF 65.

Параметр	Значение
Напряжение питающей сети, В	50
Скорость подачи проволоки, м/мин	0-25
Расход защитного газа, л/мин	5-25
Габаритные размеры, мм	620x210x445
Масса, кг	11,1

3.4. Оборудование для напыления сжатой дугой

В комплект оборудования для плазменного напыления входят следующие узлы (рис. 3.7):

- плазмотрон;
- механизм транспортирования напыляемых материалов;
- источник питания дуги;
- комплекс коммуникаций, соединяющий отдельные узлы установки и обеспечивающий подвод к плазмотрону газов и электроэнергии.

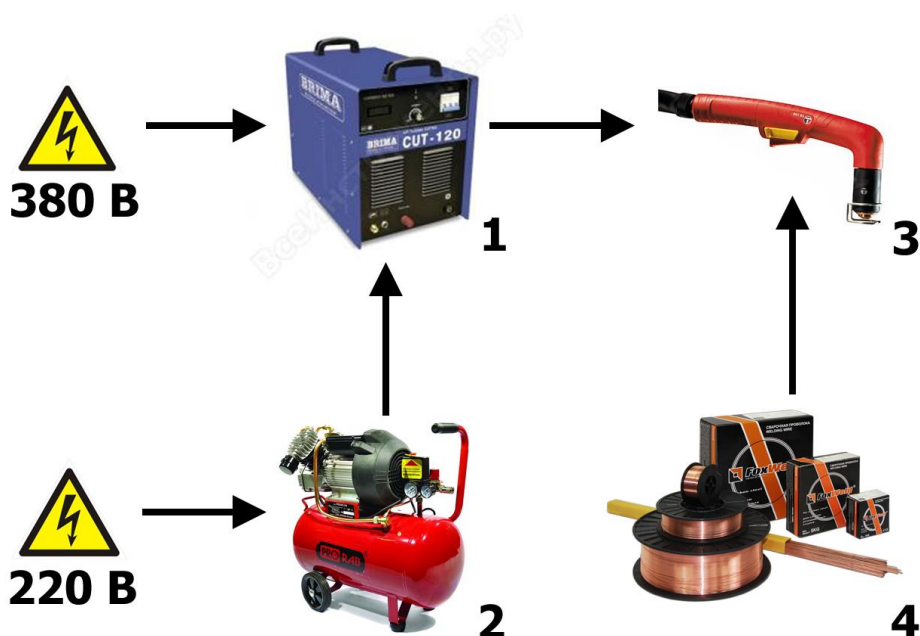


Рисунок 3.7 – Элементы оборудования для напыления сжатой дугой:

- 1 – Источник питания; 2 – Компрессор; 3 – Плазмотрон;
 4 – Напыляемый материал и механизм транспортировки.

В качестве источника питания в нашей работе использовалась установка воздушно-плазменной резки Brima CUT-120 (рис. 3.8) в комплекте с плазмотроном А-141 (рис. 3.9). Технические характеристики установки и плазмотрона представлены в таблице 3.4 и таблице 3.5, соответственно.



Рисунок 3.8 – Установка воздушно-плазменной резки Brima CUT-120.

Таблица 3.4 - Технические характеристики Brima CUT-120 [30].

Параметр	Значение
Напряжение в сети, В	380
Диапазон регулирования тока, А	20-120
Номинальное напряжение дуги, В	128
Внешний вид ВАХ	Крутопадающая
КПД, %	85
Способ возбуждения дуги	Высокочастотный разряд
Расход воздуха, м ³ /мин	0,5
Габариты, мм	475x330x370
Масса, кг	35,0

Таблица 3.5 - Технические характеристики плазмотрона А-141 [31].

Наименование характеристики	Значение
Расход газа, л/мин.	180
Давление, атм	5
Рабочий газ	Воздух
Длина коммуникации, м	6



Рисунок 3.9 – Плазмотрон А-141.

Для процессов напыления сжатой дугой могут применяться практически любые компрессоры, соответствующие требованиям рабочего давления (~4,5-5 бар) и стандартам эксплуатационной надежности и безопасности.

В нашей работе применялся компрессор В 2800В/100 PLUS СМ 3 (рис. 3.10). Технические характеристики компрессора представлены в таблице 3.6.



Рисунок 3.10 - Компрессор В 2800В/100 PLUS СМ 3.

Таблица 3.6 - Технические характеристики компрессора В 2800В/100 PLUS СМ 3.

Параметр	Значение
Ресивер, л	100
Производительность, л/мин	320
Мощность двигателя, кВт	2,2
Количество оборотов в минуту	1570

Продолжение таблицы 3.6.

Напряжение питания, В	220
Частота сети, Гц	50
Рабочее давление, бар	9
Рабочее давление, PSI	130
Габариты, мм	1070x390x800
Масса, кг	69

В качестве механизма перемещения и позиционирования сварочной горелки применялся сварочный трактор CG1-100 (рис. 3.11). Технические характеристики представлены в таблице 3.7.



Рисунок 3.11 – Сварочный трактор CG1-100.

Таблица 3.4 - Технические характеристики сварочного трактора GC1-100 [32].

Наименование параметра	Значение
Напряжение питания, В	220
Скорость движения, мм/мин	50-750
Ширина колеи рельса, мм	150
Длина кабеля сетевого, м	10
Габаритные размеры тележки, мм	450x220x450
Масса машины в сборе, кг	20

4. Методика проведения исследований

Для формирования износостойких покрытий из сплавов системы железо-алюминий можно использовать присадочные материалы, того же состава, что и покрытие или же создавать необходимый химический состав покрытия, смешивая алюминиевую присадочную проволоку с железной основой основного металла. Учитывая, что присадочные проволоки системы железо-алюминий промышленностью не выпускаются, второй вариант создания покрытий остается практически единственным.

4.1. Методика измерения геометрических параметров наплавки

Геометрические размеры наплавленных валиков измеряли электронным штангенциркулем DIGITALCALIPER с точностью измерения 0,01мм и универсальным шаблоном сварщика УШС-3. Измерения проводились непосредственно на образцах (ширина шва, величина усиления и глубина проплавления) (рис. 4.1). Образцы шлифовали.

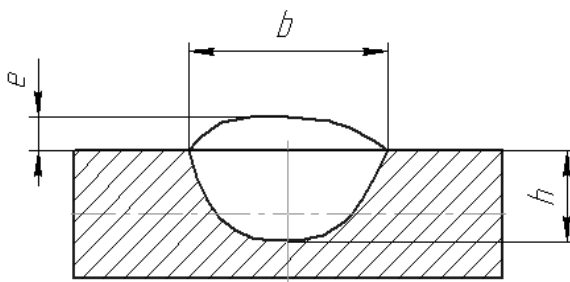


Рисунок 4.1 – Геометрические параметры шва.

4.2. Методика исследования химического, структурного и фазового состава сформированного покрытия

Анализ химического, структурного и фазового состава проводился методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) основан на регистрации различных типов сигналов, генерируемых в образце при сканировании его поверхности сфокусированным электронным зондом. Вторичные, отраженные и оже-электроны, рентгеновское излучение и другие типы

сигналов несут информацию о структуре, фазовом и химическом составе образца.

Высокая разрешающая способность, большая глубина фокуса в сочетании с наглядностью изображения, простота подготовки объектов исследований, широкие возможности элементного анализа при использовании различных систем регистрации рентгеновского излучения (волнодисперсионные (WDS) или энергодисперсионные (EDS) системы) позволяют успешно использовать метод РЭМ в материаловедческих исследованиях для изучения структуры и элементного состава покрытий, поверхностей химического взаимодействия, отложений и т. д.. Информацию о кристаллическом (фазовом) составе микрообластей исследуемых материалов, в том числе и сплавов Fe-Al, можно получить с использованием метода дифракции отраженных электронов (EBSD) [33].

Рентгеноспектральный анализ проводился в условиях ОАО «АВТОВАЗ» на комплексе сканирующего электронного микроскопа LEO 1455 VP (ZEISS, Германия) с блоками рентгеновского энергетического спектрометра INCA Energy-300 и рентгеновского волнового спектрометра INCA Wave-500 и в условиях ФГУП НИАР на комплексе состоящий из автоэмиссионного растрового микроскопа сверхвысокого разрешения Zeiss SUPRA 55VP в комплекте с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy 350, волновым спектрометром Inca Wave 500 и системой регистрации и анализа дифракции отраженных электронов HKL EBSD Premium System.

Образцы для исследований представляли собой шлифованные поверхности поперечного сечения наплавки из железоалюминиевого сплава на пластине из Ст3. Из-за недостаточного качества шлифования для реализации возможности применения методики дифракции обратно-рассеянных электронов, а также достоверного определения элементного состава наплавки в различных её областях было принято решение провести глубокое химическое травление (полировку) поверхности шлифования.

Образцы для этого протравливались на алюминий реактивом Келлера (2,5 % HNO_3 , 1,5% HCl , 1 % HF , остальное - вода), на железо – в 4 % спиртовом растворе азотной кислоты. В результате продолжительного химического травления, исследуемая поверхность приобрела сильно развитый рельеф. Тем не менее, от отдельных участков такой поверхности можно получать картины дифракции отражённых электронов, и определять на них локальные изменения элементного состава наплавки.

Последовательность проведения измерений была подобной для всех образцов.

На первом этапе регистрировались изображения исследуемой поверхности во вторичных электронах при небольших увеличениях с тем, чтобы определить особенности структурных изменений наплавки по её толщине от стали до наружной поверхности. При обнаружении каких-либо особенностей эти особенности исследовались более тщательно, получали изображения таких участков при больших увеличениях.

Далее как в целом на больших участках поверхности наплавки, так и на её локальных участках проводилось определение элементного состава наплавки, прежде всего, определялось соотношение железа и алюминия. В дальнейшем, как от отдельных участков поверхности «матрицы», так и от участков поверхности каких-либо выделений (карбиды, интерметаллиды) получали дифракционные картины. Одновременный анализ элементного состава и дифракционной картины одного и того же участка поверхности позволяет более достоверно определить принадлежность какого-либо выделения к определённому классу веществ [34, 35].

Химический анализ проводился в продольном и поперечном сечении шва, через 0,1-0,2 мм.

Схема выбора точек для исследований методом РЭМ представлена на рисунке 4.2.

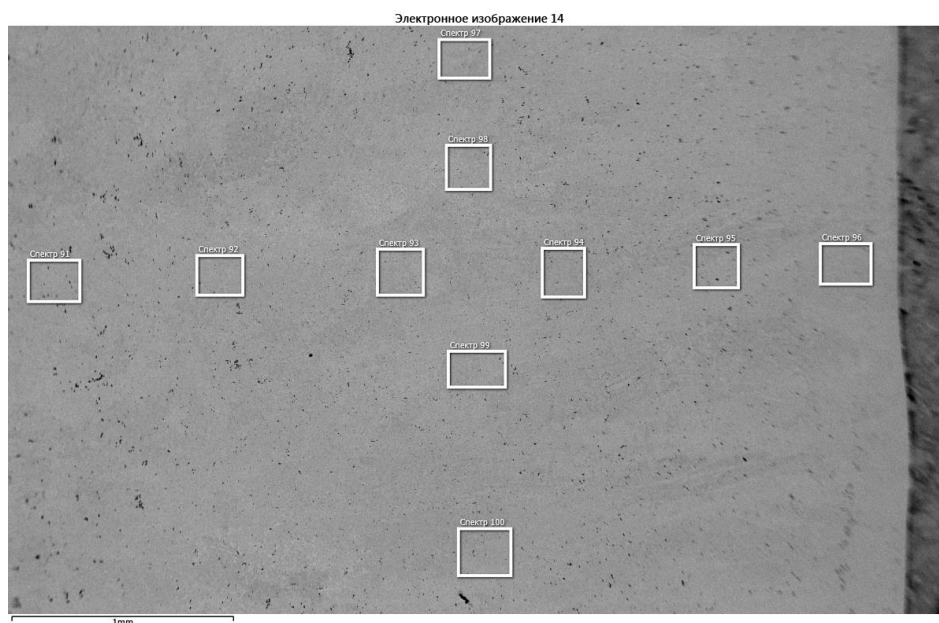


Рисунок 4.2 – Схема выбора точек для исследований методом РЭМ.

4.3. Методика исследования износостойкости и жаростойкости сформированного покрытия металла

Износостойкость сформированного покрытия при абразивном изнашивании определяется способностью ее поверхностных слоев противостоять внедрению абразивных частиц. Абразивный износ наплавленного металла исследовали на предварительно подготовленных образцах размером 15x15 мм. Одновременного, для сравнения износостойкости, испытывались образцы и из основного металла.

Для исследования износостойкости применялась экспериментальная установка, позволяющая обеспечивать стабильную нагрузку на испытуемый образец. Установка состоит из станины с закрепленным приводом, соединенным с металлическим диском. Металлический диск снабжен зажимами, с помощью которых крепится на нем абразивная шкурка. На станине под диском расположены тиски для установки испытуемых образцов. Установка снабжена таймером, позволяющим задавать необходимое время испытаний. Давление на образец при испытании регулируется установкой грузов на рычаг (рис. 4.3).

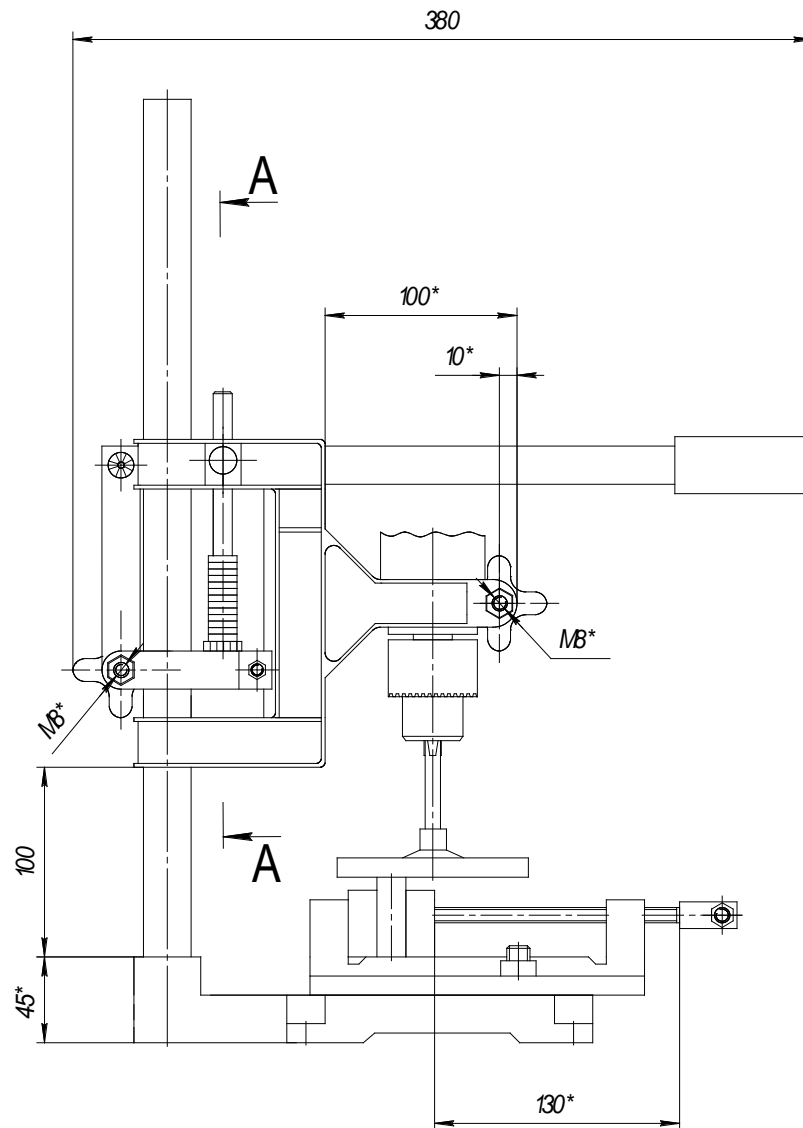


Рисунок 4.3 – Установка для испытания износостойкости.

Износостойкость при абразивном изнашивании выражается в виде относительной износостойкости:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_{\text{э}}}{\Delta l_{\text{м}}} \quad (2.1)$$

где $\Delta l_{\text{э}}$ – линейный износ эталона;

$\Delta l_{\text{м}}$ – линейный износ испытуемого материала.

Линейный износ эталона и испытуемого образца измеряли микрометром с точностью 10 мкм.

Жаростойкость наплавленного металла оценивалась при выдержке образцов в печи сопротивления при 950 °С в течение 1000 часов. Образцы с

одинаковой площадью поверхности вырезали из наплавленных валиков. Жаростойкость оценивалась по относительному изменению массы образцов.

4.4. Методика исследований процессов аргодуговой наплавки

Исследования процессов аргодуговой наплавки неплавящимся электродом осуществлялись при помощи установки, состоящей из рамы с наплавляющими рельсами; механизма позиционирования; оборудования для подачи присадочной проволоки и источника питания (рис. 4.4).

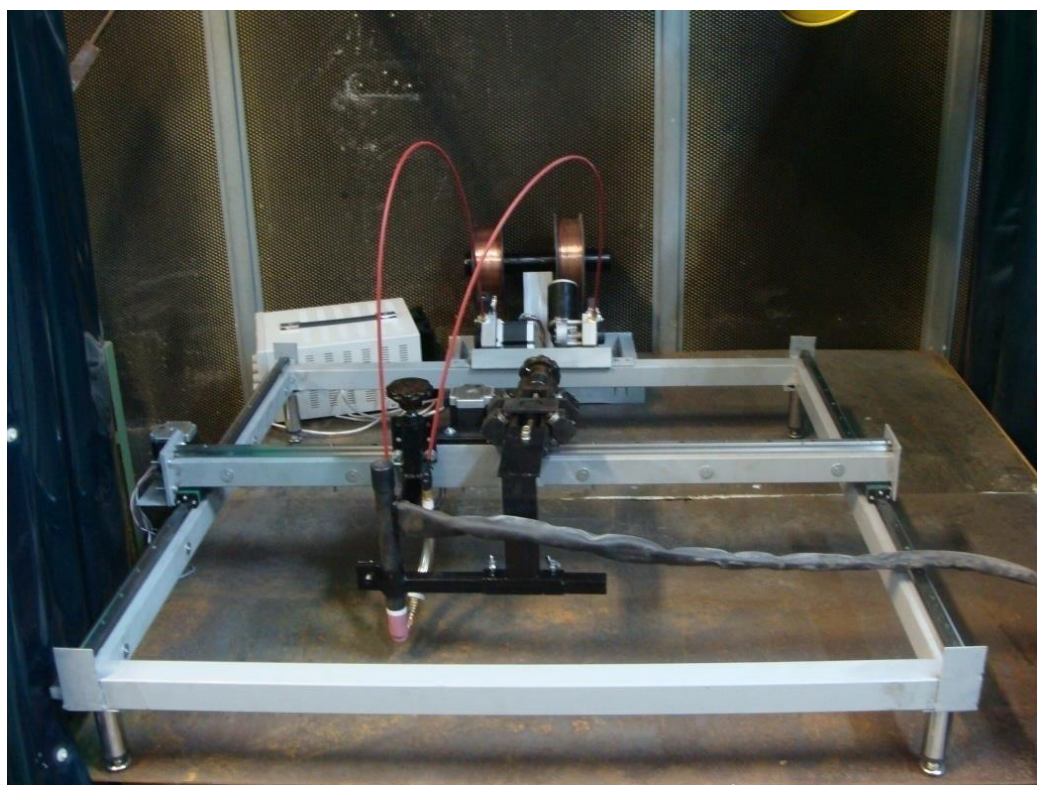


Рисунок 4.4 – Установка для автоматической аргодуговой наплавки неплавящимся электродом.

Рама установки размером 1000x1000 мм выполнена из трубы квадратного сечения 40x40. Две наплавляющие серии НГ длиной 1000мм установлены на верхней поверхности оси У. На каретки наплавляющих установлена ось Х, состоящая из квадратной трубы длиной 1000мм, идентичной наплавляющей и двух кареток.

Оборудование для подачи присадочной состоит из подающего механизма с двигателем постоянного тока типа 45402BVE фирмы ТВі

Industries GmbH. Применение подающего механизма с шаговым двигателем позволяет снизить стабильную минимальную скорость подающего механизма до 0 и работать в диапазоне скоростей подачи 0-5 м/мин.

Передвижение по осям осуществляется шаговыми двигателями при зацеплении зубчатой рейки, установленной на оси и зубчатой шестерни, установленной на валу двигателя.

Управление шаговыми двигателями осуществляется специализированными приводами, собранными в едином блоке управления, состоящем из программируемого контроллера SMC-3; программируемого блока управления SMSD-3.0 и блока питания.

Механизм позиционирования предназначен для обеспечения качества процесса наплавки путем изменения геометрии ввода подающих проволок в место сварки и позволяет регулировать длину дуги; угол ввода присадочной проволоки; высоту ввода присадочной проволоки; расстояние от мундштука до сварочной дуги.

Для наплавки использовали сварочную горелку AUT-TIG 400W фирмы Abicor-Bensel.

Для регулировки положения сварочной горелки применяли механизм, состоящий из специализированного исполнительного механизма линейного перемещения с низким люфтом передвижения. Его рабочий ход составляет 150 мм. К данному механизму крепится кронштейн для регулировки положения горелки с двумя осями, который позволяет в процессе подготовки к наплавке выставить длину сварочной дуги и положение горелки относительно точки ввода присадочных проволок.

В качестве источника питания использовали универсальный сварочный источник Migatronik BDH 550 (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Сварочный полуавтомат Migatronik BDH 550.

Для наплавки использовали образцы из стали марки Ст3 размером 120x120 мм и толщиной 10 мм, предварительно зачищенные до зеркального блеска. Наплавку производили на постоянном токе прямой полярности.

Наплавка производилась на следующих режимах (табл. 4.1): скорость наплавки составляла 0,14 м/мин. Скорость подачи алюминиевой проволоки СвА7 диаметром 1,2 мм изменялась в пределах 1,5-3,5 м/мин. Сила сварочного тока 310 А.

Таблица 4.1 – Режимы аргодуговой наплавки неплавящимся электродом.

Параметр	Значение
Сила сварочного тока, А	310
Скорость наплавки, м/мин	0,14
Скорость подачи присадочной проволоки, м/мин	1,5-3,5
Расход газа, л/мин	10
Полярность тока	Прямая
Род тока	Постоянный

4.5. Методика исследования процессов двухдуговой наплавки

Исследования процессов двухдуговой наплавки покрытий системы Fe-Al осуществлялись при помощи специально сконструированной установки, состоящей из рамы с наплавляющими рельсами; подвижного портала с закрепленными на нем двумя горелками с механизмами регулирования; двух источников питания (рис. 4.6). Данная установка обеспечивает возможность осуществления двухдуговой наплавки в автоматическом режиме.

Рама установки размером 800x350 мм крепится перпендикулярно стене специальными кронштейнами. На раме закреплена направляющая серии НГ длиной 700 мм.

Передвижение портала осуществляется шаговым двигателем при зацеплении зубчатой рейки, установленной на оси и зубчатой шестерни, установленной на валу двигателя.

Управление шаговыми двигателями осуществляется специализированными приводами, собранными в едином блоке управления, состоящем из программируемого контроллера SMC-3; программируемого блока управления SMSD-3.0 и блока питания.



Рисунок 4.6 – Установка для автоматической двухдуговой наплавки.

Механизм позиционирования предназначен для обеспечения качества процесса наплавки путем изменения геометрии ввода электродных проволок в место сварки и позволяет регулировать вылет электрода; угол ввода присадочных проволок; расстояние между дугами.

Для наплавки использовали сварочную горелку ТВІ (2 ед).

Для регулировки положения сварочных горелок применяли механизм, состоящий из специализированного исполнительного механизма линейного перемещения с низким люфтом передвижения. Его рабочий ход составляет 100 мм. К данному механизму крепится пластина с пазами для перемещения хомутов для закрепления горелок, с помощью которой осуществляется регулировка положения горелок (рис. 4.7).

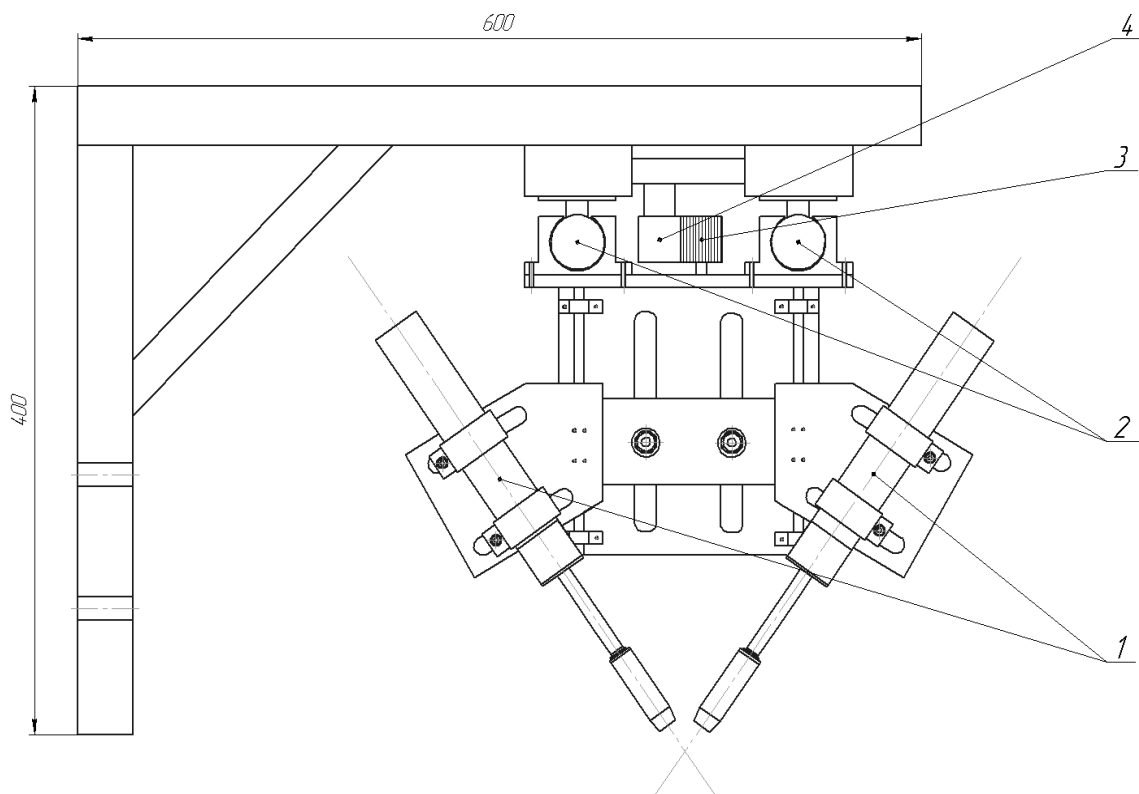


Рисунок 4.7 – Схема установки для наплавки:

- 1 – вертикальные горелки; 2 – направляющие; 3 – зубчатая шестерня;
- 4 – зубчатая рейка

В качестве источника питания использовали универсальные сварочные источники Migatronc BDH 550, в количестве 2 ед.

Для наплавки использовали образцы из стали марки Ст3 размером 120x120 мм и толщиной 10 мм, предварительно зачищенные до зеркального блеска. Наплавку производили на постоянном токе обратной полярности.

Применялись сварочные проволоки СвА7 диаметром 1,2 мм и Св-08 диаметром 1 мм.

Режимы наплавки варьировались в широких пределах (табл. 4.2). Скорость наплавки составляла 0,11-0,14 м/мин. Скорость подачи алюминиевой проволоки изменялась в пределах 2-4 м/мин, железной проволоки 3-5 м/мин. Напряжение на дуге для алюминиевой проволоки изменялось в пределах 6-12 В, а для железной 17-23 В.

Режимы наплавки устанавливались с помощью блоков настройки сварочного источника и блока управления.

Таблица 4.2 – Режимы двухдуговой наплавки.

Параметр	Значение
Скорость наплавки, м/мин	0,11-0,14
Напряжение на дуге для алюминиевой проволоки, В	6-12
Напряжение на дуге для железной проволоки, В	17-23
Скорость подачи алюминиевой проволоки, м/мин	2-4
Скорость подачи железной проволоки, м/мин	3-5
Расход защитного газа, л/мин	6-8
Полярность тока	Обратная
Род тока	Постоянный

4.6. Методика исследования процессов наплавки на синергетических режимах

Исследования процессов наплавки проводили с использованием источника питания Kemppi KMS 500 (рис. 4.8) и падающего механизма Kemppi MXF 65 (рис. 4.9) на синергетических режимах сварочного оборудования при диаметрах алюминиевой проволоки 1 и 1,2 мм. Применение синергетических режимов обеспечивает возможность установки режима одним параметром (скорость подачи проволоки), и стабилизацию процесса при изменении вылета электродной проволоки. В процессе наплавки выполняли регистрацию тока и напряжения с частотой опроса 1 кГц регистратором S-Recorder-2 с датчиком тока ДИТ-500-Н и напряжения ДНХ-01.

Образцы изготавливали из Ст3 толщиной 10мм и размерами 100x100 мм. Наплавку производили на постоянном токе обратной полярности.



Рисунок 4.8 – Источник питания Kemppi KMS 500.



Рисунок 4.9 – Подающий механизм Kemppi MXF 65.

Наплавка производилась проволокой Al99.7 из чистого алюминия диаметром 1 и 1,2 мм. Для некоторых образцов применялась повторная наплавка железной проволокой Св-08 диаметром 1,2 мм по остывшему слою наплавленного алюминия. Скорость подачи алюминиевой проволоки составляла 8-13 м/мин, скорость подачи железной проволоки составляла 8-10 м/мин. Сила сварочного тока варьировалась в широких пределах 100-500 А. Режимы наплавки приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Режимы наплавки на синергетических режимах.

№ образца	Материал и диаметр проволоки, мм	Скорость подачи проволоки, м/мин	Характеристика дугового процесса наплавки
1	Al, 1	8	Капельный перенос с умеренным разбрызгиванием
2	Al, 1	9	Мелкокапельный перенос с малым разбрызгиванием
3	Al, 1	10	Высокостабильный струйный перенос металла
4	Al, 1	11	
5	Al, 1	12	
6	Al, 1	13	
7	Al, 1,2	8	Высокостабильный дуговой процесс
8	Al, 1,2	9	
9	Al, 1,2	10	
10	Al, 1,2	11	
11	Al, 1,2	8	Высокостабильный дуговой процесс
	Fe, 1,2	10	Струйный перенос

12	Al, 1,2	8	Высокостабильный дуговой процесс
	Fe, 1,2	8	Капельный перенос

4.7. Методика исследования процессов напыления сжатой дугой

Исследования процессов напыления сжатой дугой осуществлялись при помощи специально разработанного комплекса оборудования (рис. 4.10), состоящего из установки для воздушно-плазменной резки Brima CUT-120, подключенного к ней компрессора В 2800В/100 PLUS СМ 3, поддерживающего рабочее давление в пределах 4,5-5,5 бар. Плазмотрон модели А-141 с диаметром сопла 1,7 мм закрепляется на сварочном тракторе марки CG1-100, перемещающийся по специальной направляющей, в стандартном механизме позиционирования с помощью специально изготовленной оснастки в виде элементов крепежей с низким люфтом передвижения. На сварочном тракторе также располагался механизм подачи напыляемой проволоки с установленной в него катушкой алюминиевой проволоки СвА7.

Механизм подачи проволоки представлен в виде шагового двигателя AD-200-31, жестко закрепленного на горизонтальной пластине (рис. 4.11). Проволока подается через гибкий кабель-канал в специальный мундштук, который, в свою очередь также закрепляется в механизме позиционирования трактора. Управление шаговым двигателем осуществляется специальным приводом, собранным в едином блоке управления (рис. 4.12), состоящем из программируемого контроллера SMC-3; программируемого блока управления SMSD-3.0 и блока питания.

Напыление производилось на образцы из стали марки Ст3 размером 250x100 мм и толщиной 10 мм, предварительно зачищенные до зеркального блеска. Режимы напыления представлены в таблице 4.4.

В качестве присадочного материала применялась алюминиевая проволока СвА7 диаметром 1,2 мм. Режимы напыления представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Режимы напыления сжатой дугой.

Параметр	Значение
Сила тока, А	30-70
Рабочее давление, бар	5
Дистанция напыления, мм	100-170
Скорость напыления, м/мин	0,3-0,7
Скорость подачи напыляемого материала, м/мин	1-5

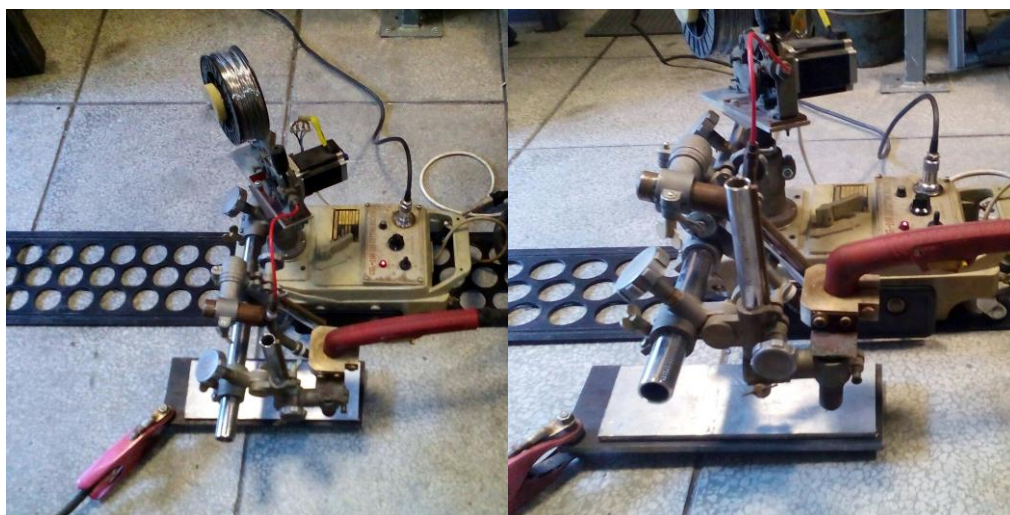


Рисунок 4.10 – Комплекс оборудования для напыления сжатой дугой.

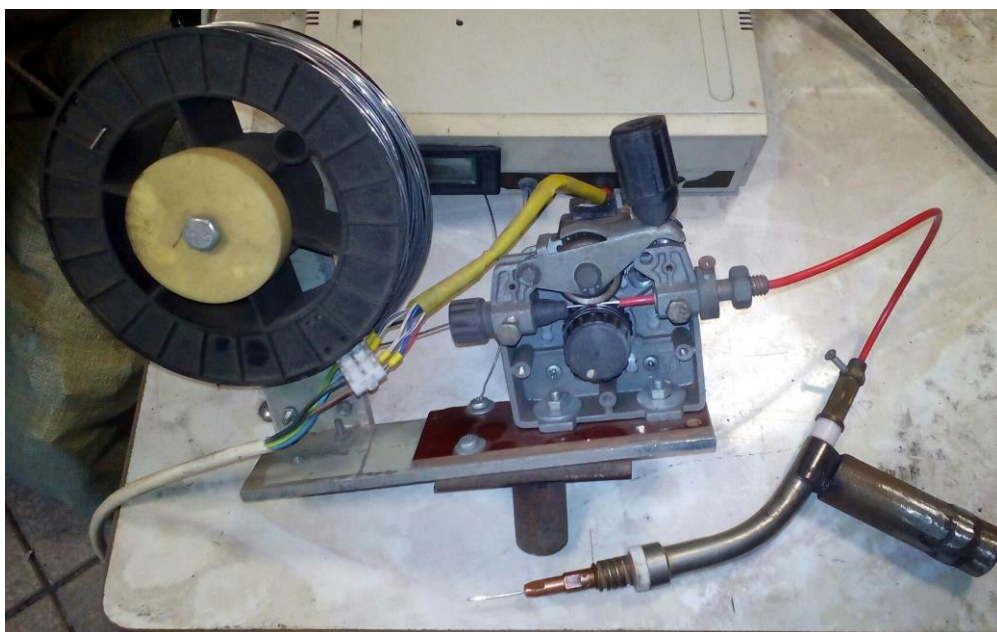


Рисунок 4.11 – Механизм подачи напыляемой проволоки.



Рисунок 4.12 – Блок управления подачей напыляемой проволоки.

5. Результаты исследований

В ходе проведенных исследований процессов формирования износостойких покрытий и их механических и эксплуатационных свойств были получены следующие результаты.

5.1. Аргонодуговая наплавка неплавящимся электродом

Проведенные исследования показали, что существующий способ аргонодуговой наплавки неплавящимся электродом позволяет формировать качественное износостойкое покрытие (табл. 5.1), однако данный способ не обеспечивает высокую производительность и однородность химического состава по поперечному сечению шва (неоднородность по алюминию ~4%).

Таблица 5.1 – Геометрические параметры, механические и эксплуатационные свойства наплавленного металла.

Параметр	$V_{п.пр.} = 1,5$ м/мин	$V_{п.пр.} = 2,5$ м/мин	$V_{п.пр.} = 3,5$ м/мин
Твердость, HRC	25,33	29,5	35,25
Площадь шва, см ²	0,683	0,696	0,807
Площадь проплавления, см ²	0,445	0,382	0,413
Площадь усиления, см ²	0,238	0,314	0,394
Глубина проплавления, мм	2,0	2,15	2,3
Величина усиления, мм	1	1,2	2
Ширина наплавленного шва, мм	11,25	11,5	12
Относительная износостойкость	4,367	5,173	5,959
Среднее содержание алюминия, %	16	22	26

Внешний вид наплавленного шва представлен на рисунке 5.1



Рисунок 5.1 – Внешний вид наплавленного шва способом аргодуговой наплавки неплавящимся электродом.

Графики зависимости площади проплавления и площади усиления от скорости подачи проволоки представлены на рисунке 5.2.

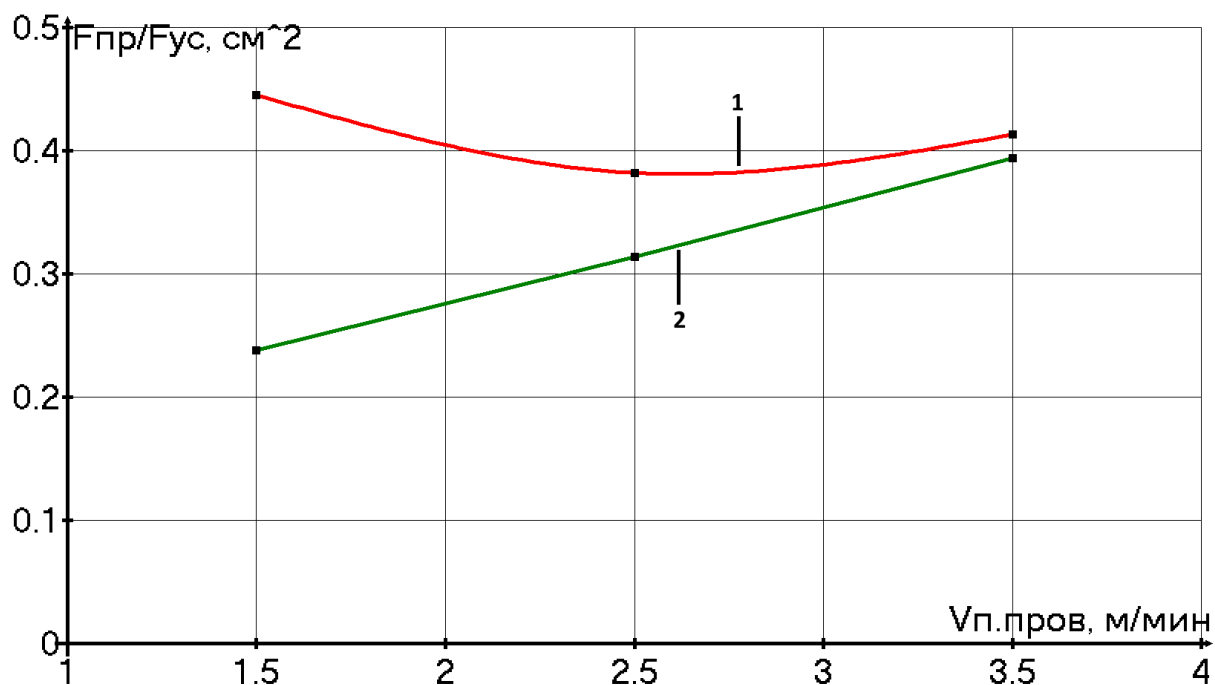


Рисунок 5.2 - График зависимости площади проплавления и площади усиления от скорости подачи проволоки: 1 – площадь проплавления; 2 – площадь усиления.

Графики зависимости геометрических параметров шва (глубина проплавления, величина усиления, ширина шва) представлены на рисунках 5.3 и 5.4, соответственно.

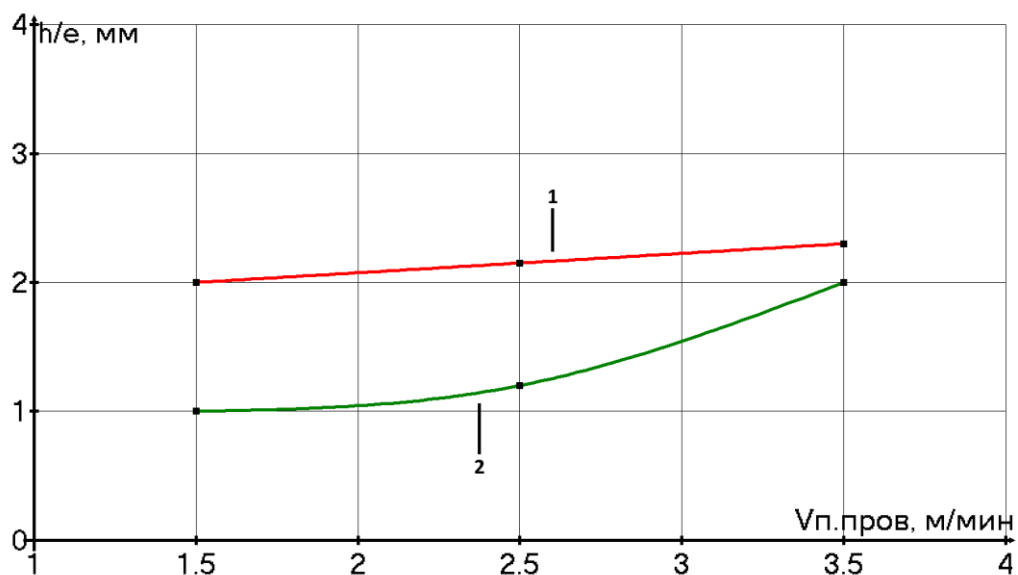


Рисунок 5.3— График зависимости глубины проплавления и величины усиления от скорости подачи проволоки: 1 – глубина проплавления; 2 – величина усиления.

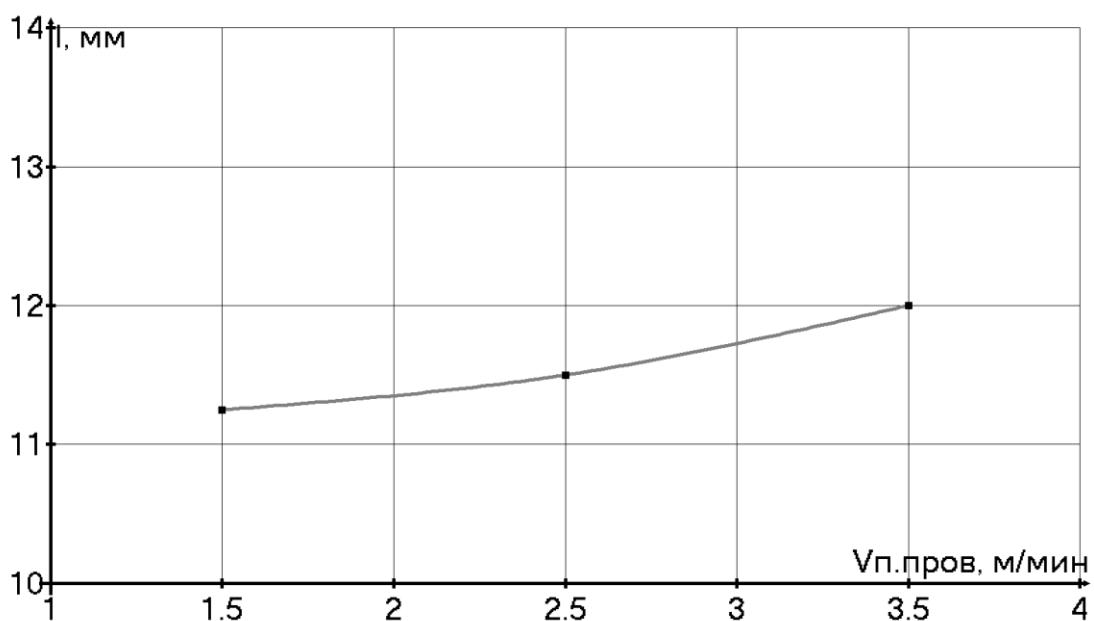


Рисунок 5.4 – График зависимости ширины шва от скорости подачи проволоки.

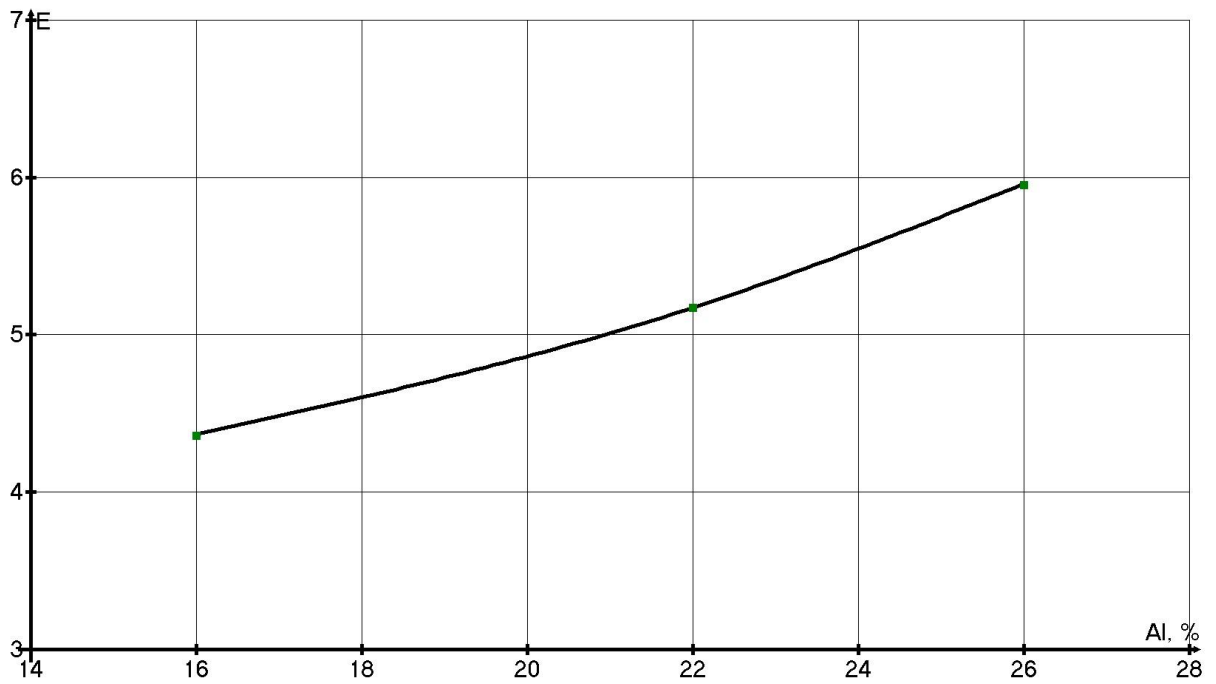


Рисунок 5.5 – График зависимости износостойкости от содержания алюминия.

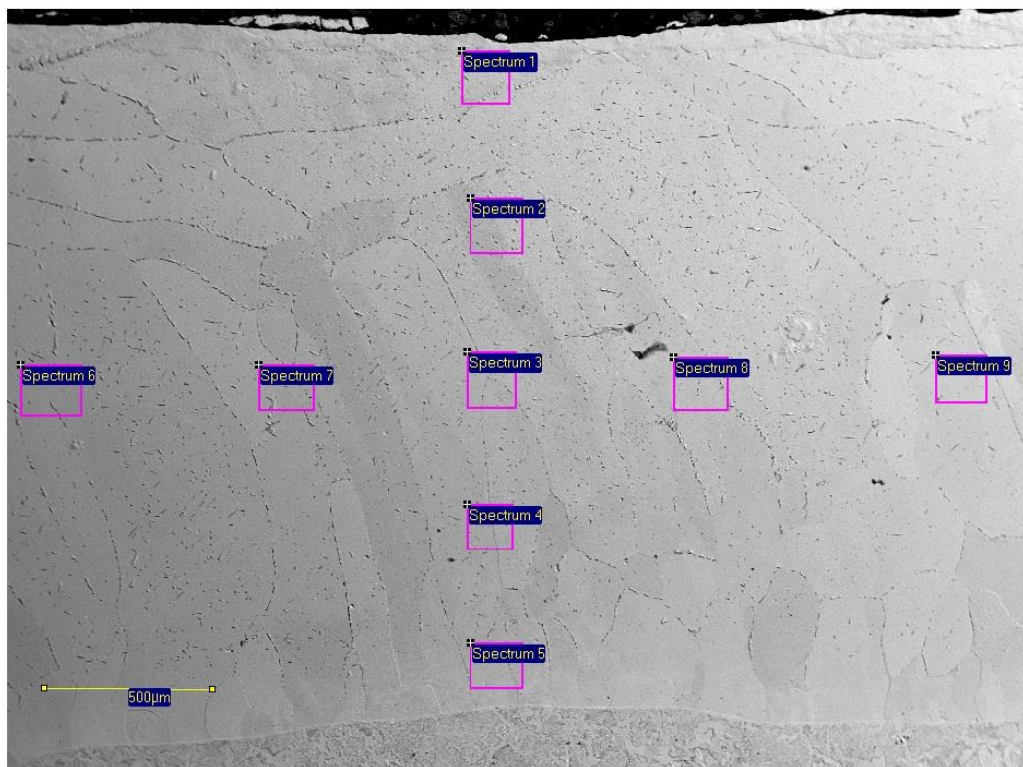


Рисунок 5.6 – Распределение алюминия по сечению наплавленного покрытия:

Spectrum 6 – Al = 12,39 % ; Spectrum 9 – Al = 16,31 % .

5.2. Двухдуговая наплавка плавящимся электродом в среде аргона

Для обеспечения однородности химического состава был предложен способ двухдуговой наплавки плавящимся электродом в среде аргона, однако недостатком данного способа является относительно низкая производительность. Проведенные исследования показали, что повышение твердости наплавленного металла практически всегда приводит к повышению значения относительной износостойкости.

Внешний вид наплавленного шва представлен на рисунке 5.7.



Рисунок 5.7 – Внешний вид наплавленного шва способом двухдуговой наплавки.

Таблица 5.2 – Геометрические параметры наплавленного шва.

№ образца	$V_{\text{под. Fe}}$, м/мин	$V_{\text{под. Al}}$, м/мин	U_{Fe} , В	U_{Al} , В	I , мм	e , мм	h , мм
1	3	3	17	10	8,8	2,45	2
2	3	5	20	12	11,9	3,2	2,3
3	5	5	23	12	13	4,5	2,4
4	3	2	17	6	10	2	1,5
5	5	2	23	6	10,85	2,65	2,2
6	5	3	23	10	11,36	3,2	2
7	4	2	20	6	10,5	2,65	2,1
8	4	3	20	10	10,6	2,7	2
9	3	4	17	12	9,3	2,35	2,2
10	4	4	20	12	10,7	2,5	2,3
11	5	4	23	12	11,24	4,2	2,5

График зависимости твердости и износостойкости от содержания алюминия представлен на рисунке 5.8 и 5.9, соответственно.

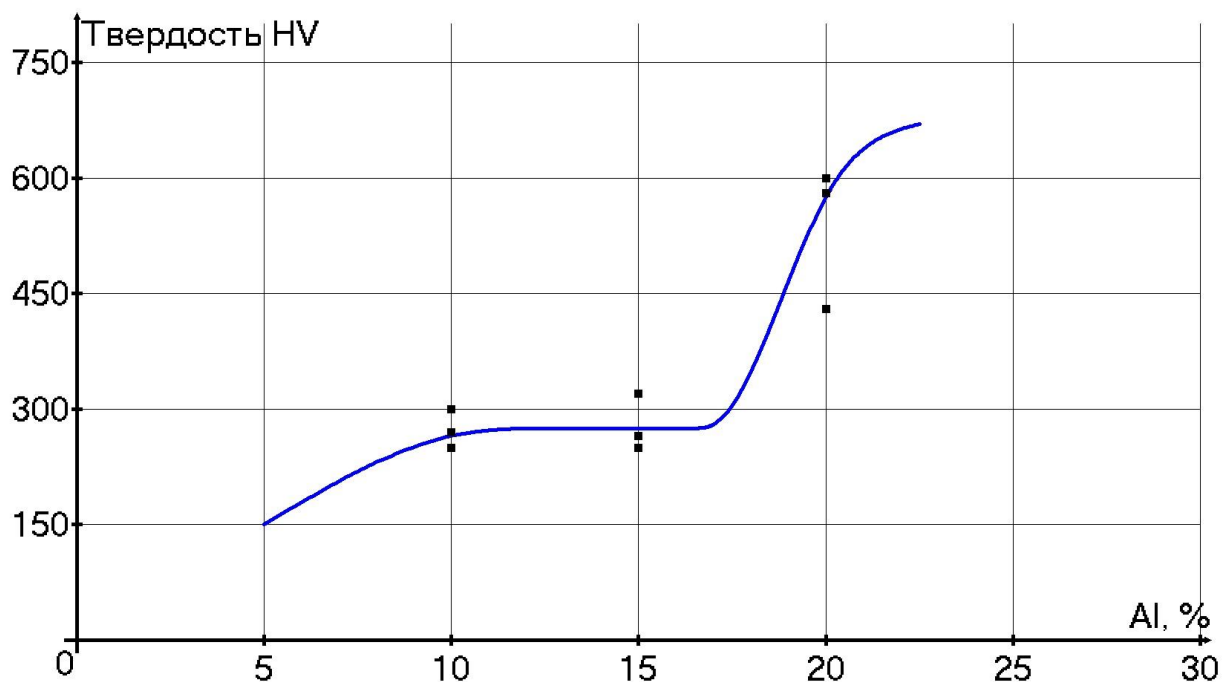


Рисунок 5.8 – График зависимости твердости от содержания алюминия.

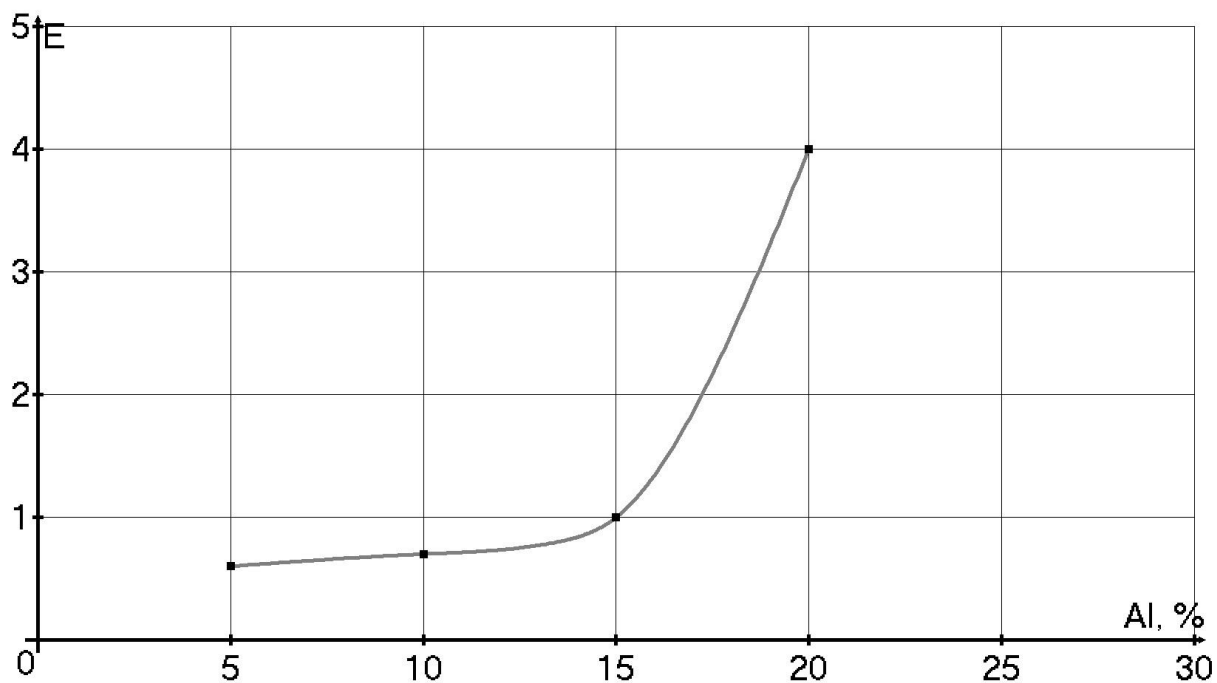


Рисунок 5.9 – График зависимости износостойкости от содержания алюминия.

Исследования жаростойкости наплавленного металла показали, что потеря массы образцов при выдержке 950 °С в течение 1000 часов не

превышает 5% (рис. 5.10). Критерий оценки жаростойкости – потеря массы в % от исходного значения массы.

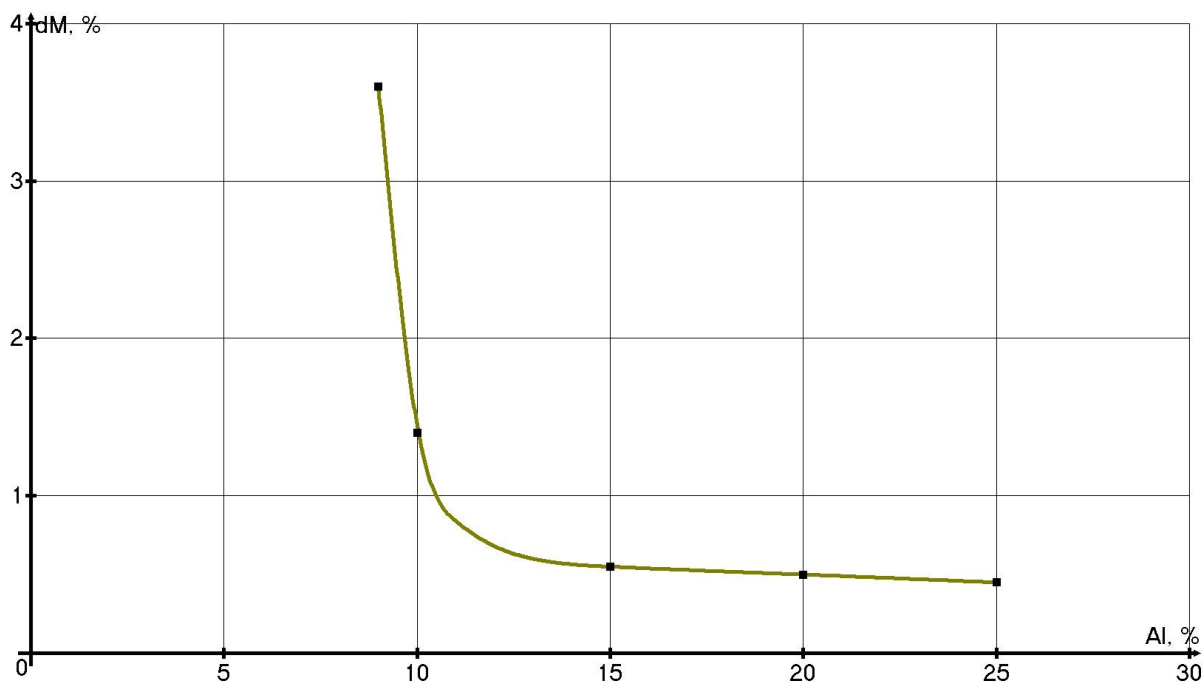


Рисунок 5.10 – График зависимости потери массы (в %) от исходного значения массы.

5.3. Наплавка на синергетических режимах плавящимся электродом в среде аргона

Проведенные исследования показали, что наплавка на синергетических режимах является высокопроизводительным методом формирования износостойких покрытий (табл. 5.3), однако для снижения содержания алюминия до рекомендованных концентраций (не выше 30%) необходимо применять повторную наплавку железа на алюминиевый слой (образец № 11, 12).

Внешний вид образцов представлен на рисунках 5.11 и 5.12.

Таблица 5.3 – Характеристика процессов наплавки на синергетических режимах.

№ образца	Материал и диаметр проволоки, мм	Скорость подачи проволоки, м/мин	Время наплавки образца, с	Расход проволоки, г	Расчетная толщина слоя алюминия, мм	Характеристика дугового процесса наплавки
1	Al, 1	8	105	29,67	1,09	Капельный перенос с умеренным разбрызгиванием
2	Al, 1	9	100	31,79	1,17	Мелкокапельный перенос с малым разбрызгиванием
3	Al, 1	10	59	20,84	0,77	Высокостабильный струйный перенос металла
4	Al, 1	11	47	18,26	0,67	
5	Al, 1	12	42	17,80	0,65	
6	Al, 1	13	37	16,99	0,62	
7	Al, 1,2	8	80	32,55	1,2	Высокостабильный дуговой процесс
8	Al, 1,2	9	77	35,25	1,3	
9	Al, 1,2	10	73	37,13	1,37	
10	Al, 1,2	11	62	34,69	1,28	

Продолжение таблицы 5.3

11	Al, 1,2	8	80	32,55	1,2	Высокостабильный
----	---------	---	----	-------	-----	------------------

						дуговой процесс
	Fe, 1,2	10	70	102,86	1,32	Струйный перенос
12	Al, 1,2	8	80	32,55	1,2	Высокостабильный дуговой процесс
	Fe, 1,2	8	111	130,49	1,67	Капельный перенос



Рисунок 5.11 – Образец №1.



Рисунок 5.12 – Образец №4.



Рисунок 5.13 – Структура наплавленного металла образца №7 (Al = 31,65 %).

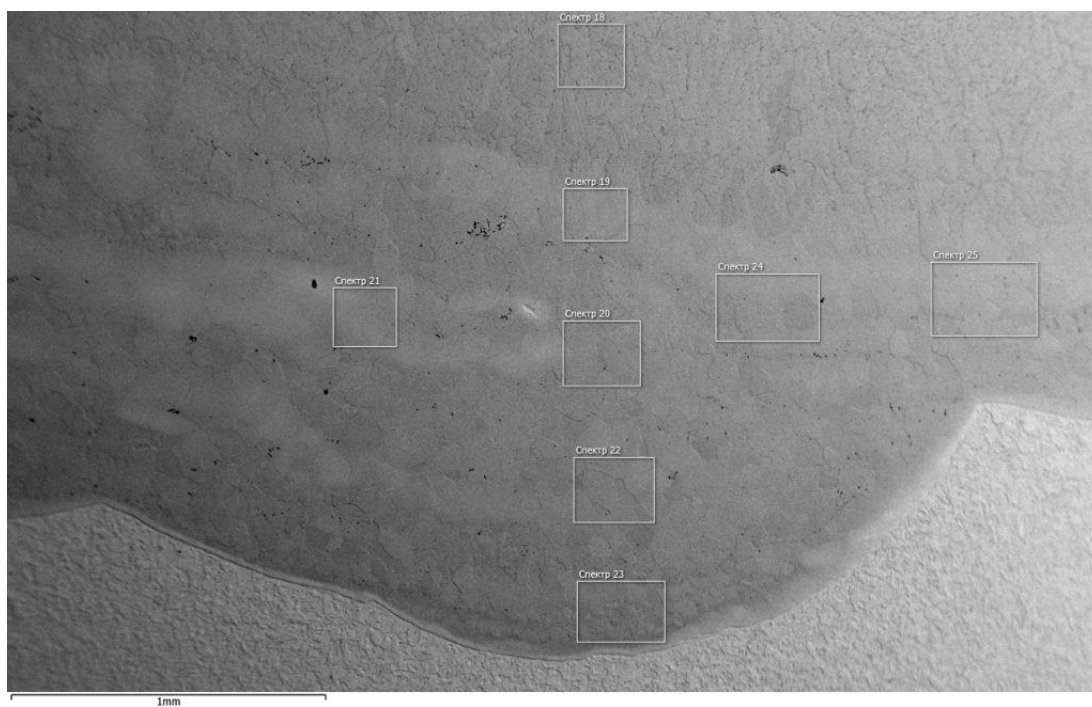


Рисунок 5.14 – Структура наплавленного металла образца №11 (Al = 18,64 %).

5.4. Напыление сжатой дугой

Проведенные исследования показали, что напыление сжатой дугой является высокопроизводительным способом формирования износостойких покрытий. Кроме того, данный способ обеспечивает однородность химического состава покрытия.

Внешний вид покрытия представлен на рисунке 5.15.



Рисунок 5.15 – Покрытие сформированное методом напыления сжатой дугой.

Режимы процесса напыления представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Режимы напыления сжатой дугой.

Параметр	Значение
Сила тока, А	30-70
Скорость подачи проволоки, м/мин	1-5
Скорость напыления, м/мин	0,3-0,7
Дистанция напыления, мм	100-170
Рабочее давление, бар	5

План эксперимента представлен в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – План эксперимента.

$V_{\text{под.Ал}}, \text{ м/мин}$	$V_{\text{нап.}}, \text{ м/мин}$	$I, \text{ А}$
1,0	0,3	30
3,0	0,5	50

5,0	0,7	70
-----	-----	----

Стабильный процесс формирования покрытия был достигнут при силе сварочного тока 50 А, скорости подачи алюминия 5 м/мин и скорости напыления 0,7 м/мин.

Выводы

В результате анализа состояния вопроса в качестве износостойких покрытий были предложены сплавы на основе интерметаллидов системы железо-алюминий, которые обладают высокой промышленной применимостью, благодаря высоким механическим и эксплуатационным свойствам. На основе анализа способов формирования износостойких покрытий и с учетом уже имеющегося оборудования были предложены следующие способы создания покрытий:

- 1) Аргодуговая наплавка неплавящимся электродом.
- 2) Двухдуговая наплавка в среде защитных газов.
- 3) Наплавка на синергетических режимах.
- 4) Напыление сжатой дугой.

Для исследования процессов формирования износостойких покрытий системы железо-алюминий была разработана методика, сконструирована и изготовлена оснастка и оборудование.

Проведённые исследования процессов формирования износостойких покрытий позволили сделать следующие заключения:

1) Существующий способ аргодуговой наплавки неплавящимся электродом не обеспечивает высокую производительность и однородность химического состава по сечению шва.

2) Для обеспечения однородности химического состава был предложен способ двухдуговой наплавки в среде защитного газа, однако недостатком данного способа является относительно низкая производительность.

3) Наплавка на синергетических режимах позволяет повысить скорость формирования покрытия, однако для снижения содержания алюминия в покрытии до рекомендуемых концентраций необходимо проводить повторную наплавку железной проволокой по алюминиевому покрытию.

4) Напыление сжатой дугой является высокопроизводительным способом, обеспечивающим однородность сформированного покрытия при минимальном проплавлении металла изделия.

Список используемых источников

1. Рябов В. Р. Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами / В.Р. Рябов. – Киев.: Наук. Думка, 1983. – 264 с.
2. Хансен М. Структура двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко – М.: Металлургиздат, 1962. – 210 с.
3. Гольдштейн М. И. Специальные стали: учебник для вузов / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
4. Рябов В. Р. Алитирование стали / В.Р. Рябов – М.: «Металлургия», 1973.
5. Рябов В. Р. Применение биметаллических и армированных сталеалюминиевых соединений / В. Р. Рябов. – М.: «Металлургия», 1975. – 288 с.
6. Алитирование [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Алитирование>
7. Рябов В. Р. Алитирование стали / В.Р. Рябов – М.: «Металлургия», 1973.
7. Алитирование методом погружения [Электронный ресурс]. URL: http://galvanics.ru/alitirovanie/alitirovanie_metodom_pogruzheniya
8. Плакирование [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Плакирование>
9. Термо и гальванообработка [Электронный ресурс]. URL: http://galvanics.ru/alitirovanie/metody_alitirovaniya
10. Наплавка [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Наплавка>
11. Технологии конструкционных материалов. Наплавка [Электронный ресурс]. URL: <http://helpiks.org/1-31346.html>
12. Аргодуговая сварка [Электронный ресурс]. URL: <http://www.osvarke.com/argonodug.html>

13. Сварка и наплавка в среде защитных газов [Электронный ресурс]. URL: <http://fan-5.ru/best/best-178584.php>
14. Двухдуговая сварка [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ngpedia.ru/id410514p1.html>
15. Синергетические функции сварочных установок [Электронный ресурс]. URL: <http://weldingsite.com.ua/st218.html>
16. Газотермическое напыление [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Газотермическое_напыление
17. Плазменное напыление [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Плазменное_напыление
18. Плазменное напыление порошковых покрытий [Электронный ресурс]. URL: <http://www.plasmacentre.ru/technology/17.php>
19. Детонационное напыление [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Детонационное_напыление
20. Технология детонационного напыления [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tspsc.ru/tech/DET.php>
21. Холодное газодинамическое напыление [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ХГН>
22. Холодное газодинамическое напыление [Электронный ресурс]. URL: <http://www.itam.nsc.ru/ru/section/322/>
23. Свойства напыленных металлов [Электронный ресурс]. URL: <http://chem21.info/info/1656625/>
24. Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Папырин А.Н. Метод «холодного» газодинамического напыления. — Докл. АН СССР, 1990, т.315, № 5, с.1062-1065.
25. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика.— М. Физматлит, 2010, 536 с.

26. Каширин А. И., Шкодкин А.В. Газодинамическое напыление металлических покрытий— возникновение метода и его современное состояние.— Упрочняющие технологии и покрытия. 2007, № 12(36), с. 22-33.
27. Вакуумно-конденсационное напыление [Электронный ресурс]. URL: <http://mash-xxl.info/info/121565>
28. Migatronic BDH 550 Manual [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cbl-welding.com/pdf/BDH%20320-400-550.pdf>
29. Kemppi Fastmig KMS 500 Manual [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tiberis.ru/products/kemppi-fastmig-kms-500>
30. Установка воздушно-плазменной резки Brima CUT-120 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.brima.ru/catalog/uvp/cut-120/>
31. Плазмотрон А141 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.shtorm-its.ru/catalog/item/plazmotron--a-141>
32. Машина термической резки CG1-100 [Электронный ресурс]. URL: <http://gazcut.ru/products/mashina-termicheskoy-rezki-cg1-100>
33. Растровый электронный микроскоп [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/РЭМ_микроскоп
34. Гончаренко Ю. Д., Евсеев Л. А. Особенности применение методов РЭМ и ВИМС для изучения элементного состава рыхлых отложений на металлической подложке // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2002, №10. С.61-65.
35. Криштал М.М., Ясников И.С., Полуин В.И., Филатов А.М., Ульяненок А.Г. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный анализ в примерах практического применения. М.: Техносфера, 2009. 208 с.