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)

15.03.01 Машиностроение
(код и наименование направления подготовки)

Технология сварочного производства и инженерия поверхностей
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Исследование структуры и свойств интерметаллидных сплавов системы железо-алюминий при двухдуговой наплавке

Обучающийся С.О. Белоногов
(И.О. Фамилия) (личная подпись)

Руководитель к.т.н., доцент А.Г. Бочкарев
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), И.О. Фамилия)

Консультанты А.Н. Кирюшкина
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), И.О. Фамилия)

к.ф.-м.н., доцент Д.А. Романов
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), И.О. Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

Выпускная квалификационная работа посвящена исследованию структуры и свойств интерметаллидных сплавов системы железо-алюминий (Fe-Al), наносимых методом двухдуговой наплавки с использованием электродных проволок, с основной целью повышения износостойкости деталей горнодобывающего оборудования (ГДО).

Основное внимание уделено разработке технологии двухдуговой наплавки с использованием стальной (ER70S-6) и алюминиевой (Св-А7) электродных проволок. Определены оптимальные режимы процесса, включая скорость подачи проволоки, напряжение на дуге и скорость наплавки. Исследованы геометрические параметры, химический состав, твердость, износостойкость и жаростойкость наплавленных покрытий.

Объем выпускной квалификационной работы составляет 59 страниц, включая в свое содержание графическую часть из шести плакатов, и состоит из пяти разделов, заключения и списка литературных источников.

Annotation

The thesis is devoted to the study of the structure and properties of intermetallic alloys of the iron-aluminum (Fe-Al) system, which are applied by double-arc surfacing using electrode wires, with the main goal of increasing the wear resistance of mining equipment parts (MEP).

The focus is on the development of a two-sided welding technology using steel (ER70S-6) and aluminum (Sv-A7) electric motors. The optimal process parameters, including the wire feed speed, arc voltage, and surfacing speed, have been determined. The geometric parameters, chemical composition, hardness, wear resistance, and heat resistance of the deposited coatings were studied.

The volume of the graduation qualification work is 59 pages, including a graphic part of six posters, and consists of five sections, a conclusion, and a list of references.

Содержание

Введение 5
1 Современное состояние горнодобывающего оборудования 8
1.1 Анализ применяемых материалов и их свойств 9
1.2 Методы повышения свойств деталей ГДО 10
1.3 Свойства сплавов на основе алюминидов железа 22
2 Исследование структуры и свойств интерметаллидных сплавов системы железо-алюминий при двухдуговой наплавке 26
2.1 Методика проведения исследования процессов двухдуговой наплавки 26
2.2 Методика исследования химического состава наплавленных покрытий 30
3 Результаты исследований 35
3.1 Результаты исследований наплавки интерметаллидных сплавов на основе Fe-Al 35
4 Предложение по безопасности и экологичности в объектах исследований 41
4.1 Особенности проектного технологического процесса 41
4.2 Анализ неблагоприятных и опасных производственных факторов 42
4.3 Методика и средства для устранения или минимизирования производственных рисков 43
4.4 Пожарная безопасность технологического процесса 45
4.5 Мероприятия по экологической безопасности 47
5 Обоснование экономической эффективности предлагаемых в выпускной квалификационной работе 49
Заключение 55
Список используемой литературы 57

Введение

Эффективность любого производства в первую очередь определяется применяемыми материалами, технологиями получения и изготовления деталей. Повышение экономической эффективности можно достигать путем увеличения ресурса работы применяемых деталей или применения более прогрессивных технологий получения продукции. Одним из развивающихся направлений является горнодобывающая промышленность. Детали и узлы, применяемые для получения и переработки горных пород, эксплуатируются в тяжелых производственных условиях, поэтому должны сочетать в себе высокие показатели прочности, твердости и износостойкости. В качестве материалов применяемых для деталей горнодобывающего оборудования (ГДО) применяют в основном высокоуглеродистые и легированные стали такие как: 110Г13Л, 400Х (Hardox), 15ХСНД, N9060, 6Х2ВС, 40Х, 65Г и т.д. Однако применяемые материалы являются достаточно дорогостоящими, поэтому используют различные методы повышения стойкости и восстановления изношенных деталей.

В основном стойкость применяемых материалов повышают методами термической обработки (ТО) или путем наплавки защитных износостойких покрытий. Также возможны способы повышения стойкости деталей, применяя методы химико-термической обработки (ХТО), такие как оксидирование, азотирование и т.д. Однако применение данных методов сопряжено с дополнительными технологическими операциями, поэтому наиболее перспективным направлением является нанесение постоянных защитных покрытий.

Для повышения ресурса работы деталей ГДО в основном используют наплавку износостойкими материалами, но стоимость таких материалов может достигать десятки тысяч рублей за килограмм электродного или присадочного материала. Также можно наносить защитные покрытия

методами жидкофазного алитирования, но главным недостатком таких покрытий является недостаточная толщина наносимого износостойкого материала. Такая же проблема характерна и для методов напыления. Помимо малой толщины наносимого слоя у напылённых покрытий низкая прочность сцепления покрытия с основой, которой часто недостаточно или приходится усложнять технологический процесс (нанесение рваной резьбы, подогрев и т.д.) для повышения прочности сцепления, что также ограничивает область применения данного процесса. Поэтому основной технологией повышения стойкости деталей ГДО является наплавка, которая также позволяет восстанавливать детали после износа, что, безусловно, повышает экономическую эффективность так как отпадает необходимость в покупке и изготовлении новых деталей.

Одним из перспективных материалов современного материаловедения который можно было бы наносить на детали ГДО, являются сплавы на основе алюминидов железа. Интерметаллидные сплавы системы железо-алюминий полностью отвечают предъявляемым требованиям к деталям ГДО, а именно: повышенные показатели твердости и износостойкости. Помимо указанных свойств, сплавы на основе алюминидов титана обладают высокими показателями коррозионной стойкости. Нанесение алюминидов железа возможно при помощи лазерной, электроннолучевой, электродуговой наплавки. Однако для применения лазерной и электроннолучевой наплавки требуется дорогостоящее оборудование, которое также затруднительно использовать в монтажных полевых условиях. Поэтому наиболее простыми и перспективными методами нанесения сплавов на основе алюминидов железа являются дуговые способы, которые позволяют наносить слои толщиной более 0,5 см, что также удовлетворяет требованиям по нанесению защитных покрытий для деталей ГДО.

Известны способы получения интерметаллидных сплавов аргонодуговой наплавкой неплавящимся электродом в среде защитных газов,

аргонодуговая наплавка плавящимся электродом (однодуговая или двухдуговая). Также возможно использовать наплавку плавящимся электродом применяя порошковую проволоку на основе алюминидов железа. Анализируя применяемые и известные способы, наиболее целесообразным видится получение алюминидов железа путем двухдуговой наплавки с использованием алюминиевой и стальной электродных проволок. Применение аргонодуговой наплавки неплавящимся электродом нецелесообразно в виду большой глубины проплавления основного металла и отсутствия перспектив по дальнейшему восстановлению наплавленного слоя. Применение электродуговой наплавки порошковой проволоки также нецелесообразно в виду необходимости изготовления порошковой проволоки с заданным химическим составом, а промышленного применения таких материалов в настоящее время нет.

На основе анализа возможных способов повышения стойкости стальных деталей ГДО и применяемых материалов была сформулирована цель работы: повышение показателей стойкости стальных деталей путем исследования процессов и разработки технологии формирования постоянных интерметаллидных покрытий системы железо-алюминий при двухдуговой наплавке.

1 Современное состояние горнодобывающего оборудования

Основными производственными узлами ГДО являются: дробильное оборудование (рисунок 1), горно-транспортные установки (рисунок 2), вспомогательное оснащение, все это ключевое оборудование изготавливается из высоколегированных износостойких сталей.

Рисунок 1 – Щековая дробилка

Рисунок 2 – Горно-транспортная установка

1.1 Анализ применяемых материалов и их свойств

Детали ГДО работают в условиях абразивного износа. Типовыми представителями деталей ГДО, где износостойкость играет важную роль, являются: плита щековой дробилки, сито грохота и т.д. (рисунок 3, 4)

Рисунок 3 – Плита щековой дробилка

Рисунок 4 – Сито грохота

В соответствии с жесткими условиями эксплуатации, которым подвергается оборудование и детали ГДО к применяемым материалам предъявляются повышенные свойства твердости и износостойкости

поверхности деталей. В качестве материалов для изготовления деталей ГДО используют, низкоуглеродистые, высокоуглеродистые и легированные стали, а также стали с добавлением кобальта, ванадия, вольфрама, за счет чего повышая механические показатели износостойкости в несколько раз, однако производство таких сталей обходится дорого [19, 31].

Таблица 1 – Механические показатели нескольких марок сталей

Сталь	σ0,2, (МПа)	σВ, (МПа)	δ5, (%)	Ψ, (%)	KCU(Дж/см^2)	HRC
Ст3	225	430	22–26	50–55	49–59	25-35
09Г2С	320	475	21–23	50–55	49–59	18
65Г	700	900	8–12	25–35	30–50	50
110Г13Л	400	900	25-40	30-50	100-200	55
Р6М5К5	2300	2800	8-12	20-30	20-30	65

Чем выше механический показатель твердости у стали, тем дороже в изготовлении она будет обходиться. Альтернативным способом повышения износостойкости металлов используют разного рода технологий, закалка, химико-термическая обработка, наплавка, альтернативным способом повышения износостойкости поверхности, можно рассмотреть интерметаллидный сплав на основе алюминидов-железа [17].

1.2 Методы повышения свойств деталей ГДО

Для улучшения работоспособности применяют различного рода технологий для повышения износостойкости, термическая обработка, химико-термическая, а также методы нанесения защитных покрытий [7].

1.2.1 Закалка деталей ГДО

Закалка — это процесс термической обработки металлов и сплавов путем нагрева их до определенной температуры с последующим быстрым охлаждением (рисунок 5). Применяется для улучшения механических характеристик.

Рисунок 5 – Закалка деталей ГДО в печи

Типовой процесс процесса закалки можно рассмотреть на примере стали 65Г. Закалка данного материала выполняется при температуре 830, с последующим охлаждением в масле. После выполняется отпуск при 200℃. Сталь 65Г по указанному режиму она приобрела показатели твердости 61 HRC. В зависимости от параметров закалки и отпуска твердость материала будет разная (таблица 1).

Достоинства процесса закалки заключается в повышении твердости, ударостойкости и износостойкости.

В качестве недостатков закалки можно выделить следующее: высокая трудоемкость производства, окисление и обезуглероживание поверхности, неравномерное распределение твердости [7].

Таблица 2 – Механические свойства стали 65Г в зависимости от температуры отпуска [17].

Механические свойства стали 65Г в зависимости от температуры отпуска						
Температура отпуска, °С	σ0,2, (МПа)	σВ, (МПа)	δ5, (%)	Ψ, (%)	KCU(Дж/см^2)	HRC
Закалка 830°С,масло						
200	1790	2200	4	30	5	61
400	1450	1670	8	48	29	46
600	850	880	15	51	76	30

Ступенчатая закалка. Это процесс, при котором изделие нагревается до температуры закалки, потом деталь быстро охлаждается до промежуточной температуры, после этого деталь выдерживается при промежуточной температуре для выравнивания тепла по всему объему конструкции, частично принимает аустенитную форму и в заключение она окончательно охлаждается до комнатной температуры завершая формирование структуры (рисунок 6). Применяются для закалки конструкций сложной формы.

Достоинством данного способа является, уменьшенное термическое напряжение, хорошо подходит для закалки легированных сталей.

Недостатками: данного способа ограничена сложностью процесса, высокой стоимостью и требованием к оборудованию, а также занимает много времени в производстве [7].

Рисунок 6 – Схема ступенчатой закалки

1.2.2 Химико-термическая обработка

Азотирование**.** Это химико-термический процесс насыщения поверхности стальной детали атомами азота, за счет чего повышается твердость, износостойкость. Азотирование производят в муфельных печах, (рисунок 7) режимы азотирования зависят от марки стали и включают температуру нагрева, продолжительность выдержки, глубину слоя и твердость поверхности. Например, для стали 38Х2МЮА температура нагрева составляет 510 °С для первой ступени и 550 °С для второй ступени, продолжительность выдержки — 15 и 25 часов соответственно, глубина слоя — 0,50-0,60 мм, а твердость поверхности — 27 HRC. При повышении температуры азотирования твердость слоя снижается, но процесс диффузии азота в структуру металла ускоряется.
Достоинства: минимальная деформация, улучшение износостойкости, повышение твердости поверхности.
Недостатки: длительность процесса, ограниченная глубина слоя, снижение твердости при повышении температуры [13].

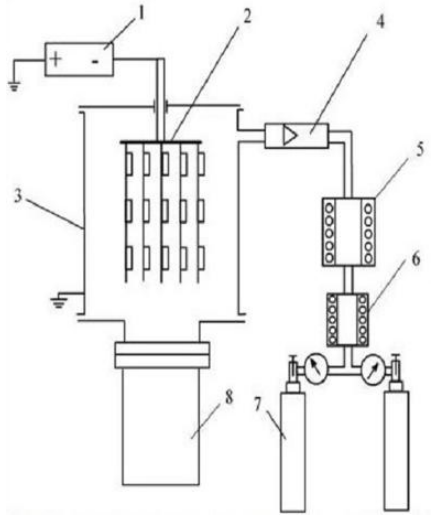

Рисунок 7 – Схема азотирования

1 - источник питания; 2 - навеска с изделиями; 3 - вакуумная камера;
4 - ротаметр; 5,6 - фильтры; 7 - баллоны с газом; 8 - форвакуумный насос

Цементация. Это процесс диффузионного внедрения активного углерода в структуру поверхностной прослойки детали толщиной от 0.1 до 3 мм (рисунок 8). Применяются для науглероживания стали, чтобы получить высокоуглеродистый поверхностный слой, который имеет твердую и износостойкую структуру.

Достоинствами цементации можно выделить: высокая поверхностная твердость, сохранение вязкости и прочности сердцевины детали, возможность обработки деталей сложной формы.

Недостатками являются: длительность процесса, необходимость последующей термической обработки, ограниченная толщина цементирования [13].

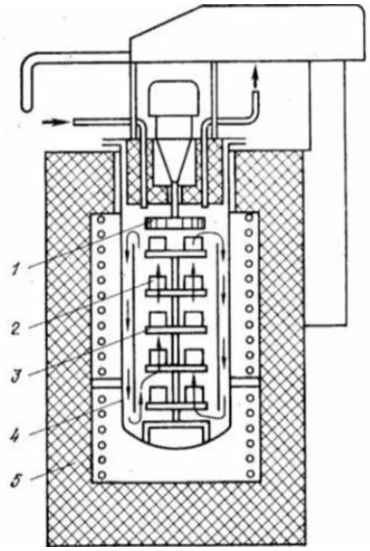

Рисунок 8 – Процесс цементации.

1 - вентилятор; 2 – обрабатываемые изделия; 3 приспособления для укладки деталей; 4 - контейнер; 5 - электропечь

«Алитирование**.** Это разновидность диффузионной металлизации, которая характеризуется насыщением поверхностного слоя алюминием (рисунок 9). Применяется для повышения износостойкости, коррозионной стойкости поверхностей деталей. Оптимальным способом нанесения является, алитирование с погружением, полный рабочий цикл составляет 15 минут. Относительнао низкая рабочая температура, которая варьируется в

диапазоне от 600 до 800°С, это является дополнительным преимуществом. Суть способа заключается в погружении заготовки в расплавленный алюминий. Поверхностный слой металла нагревается, улучшая проникающие свойства алюминия. В результате получается слой толщиной до 0,1 мм» .

Достоинства: низкая трудоемкость, малые денежные затраты. Недостатки: сложность контроля толщины покрытия, ограниченная толщина покрытия [10,21].

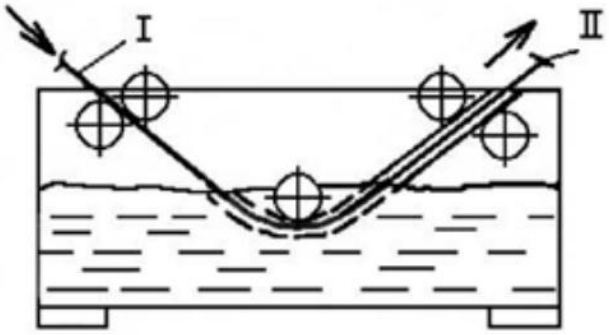

Рисунок 9 – Схема алитирования

1.2.3 Повышение износостойкости путем напыления

Газопламенное напыление**.** Это нанесение материала путем распыления расплавленного порошка, проволоки, шнуры на подготовленное изделие, расплавление происходит путем кислородного-ацетиленового пламени.

За счет данного процесса, можно быстро нанести напыление любых сплавов, металлов, повысив их поверхностные механические свойства.

Достоинства: малое проплавление основного металла, универсальность в наносимых материалов и обработка сложных форм

Недостатки: малая толщина покрытия, пористость покрытия [12].

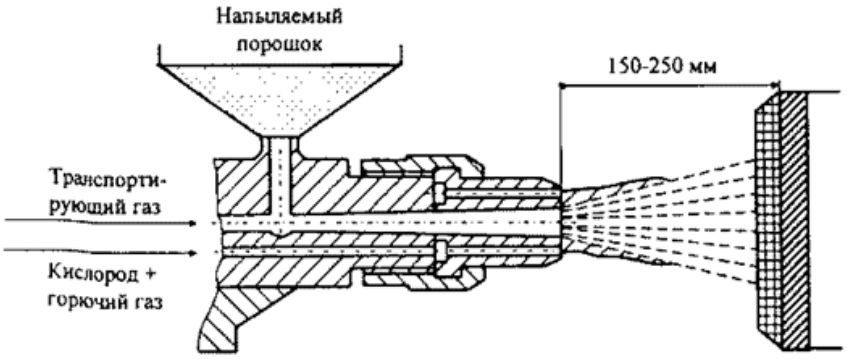

Рисунок 10 – Схема геотермического напыления

Электродуговое напыление. Это процесс напыления, в качестве концентратора нагрева используется дуга, которая зажигается между двумя электродами, нагревая и расплавляя проволоку, после потоком сжатого воздуха, расплавленные частицы проволоки распыляются и наносятся на поверхность конструкции.

Применяется для восстановления стальных, чугунных и цветных металлов, сложных форм.

Достоинства: стойкость покрытия к истиранию, простота в использовании, высокая производительность.

Недостатками можно назвать: это чрезмерный перегрев конструкции и окисление наносимого материала и выгорание легирующих элементов в дуге [2].

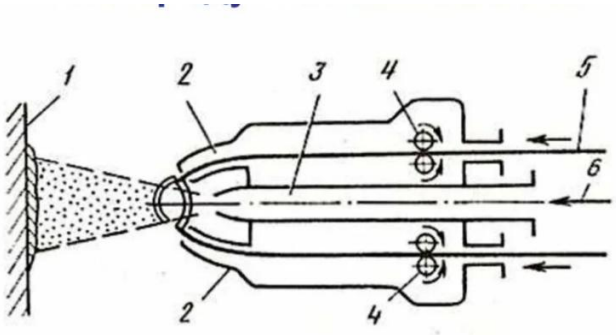

Рисунок 11 - Электродуговое напыление

1 - напыляемая поверхность; 2 - направляющие наконечники;

3 - воздушное сопло; 4 - механизм подачи проволоки; 5 - проволока;

6 - сжатый воздух

Плазменное напыление. Это один из видов газотермического напыления. В данном способе источником нагрева используется за счет плазмы, напыляемый материал расплавляется и переносится на поверхность изделия. Применяется для восстановления геометрии, упрочнения и защиты деталей.

Преимуществами плазменного напыления: широкий выбор материалов, высокая производительность, обработка деталей трудных форм.

Недостатки процесса: ограниченная глубина напыления , пористое покрытие [18].

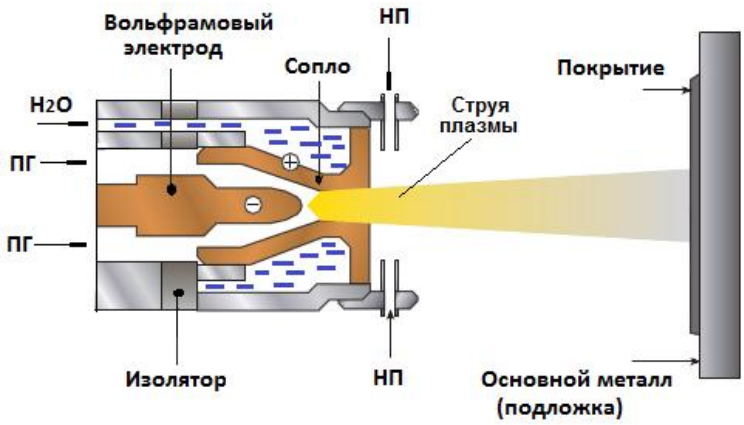

Рисунок 12 – Схема плазменного напыления

1.2.4 Наплавка износостойких покрытий

Электронно-лучевая наплавка**.** Это процесс нанесения на поверхность изделия покрытия заданной формы и свойств с помощью теплового источника в виде электронного луча. Процесс наплавки происходит в вакуумной камере и фокусируется на поверхности детали где он плавит материал, порошок или проволоку.

Применяется для восстановления изношенных поверхностей, восстановления геометрии, и получения износостойкого поверхностного слоя.

Преимущества: малое тепло вложение, высокая точность, низкое проплавление.

Недостатки: необходима вакуумная среда, ограничение в размерах деталей, сложность выполнения в полевых работах, высокая стоимость оборудования.

Лазерная наплавка - это процесс формирования поверхностного слоя путем подачи наплавочного материала (в основном в виде порошка, реже в виде проволоки) в зону сфокусированного в область диаметром 1,0…5,0 мм лазерного луча.

Используют для восстановления изношенных деталей, и нанесения износостойких покрытий.

Достоинствами данного способа наплавки является: малое тепло вложение в основной металл, также малое проплавление, высокая точность, способность наплавки в труднодоступных местах. Недостатки: высокая стоимость оборудования, сложность работы в полевых условиях, низкая производительность [6,24,26,39].

Рисунок 13 – Лазерный способ наплавки

«Аргонодуговая наплавка**.** Аргонодуговая наплавка – это технология наплавки, осуществляемая в среде инертного газа аргона. В качестве электрода, как правило, применяется неплавящийся вольфрамовый стержень. Дуга горит между электродом и основным металлом, расплавляя основной металл, формируется сварочная ванна, в нее подается присадочная проволока тем самым при застывании образуется наплавленный слой. Аргон практически не взаимодействует с расплавленным металлом и другими газами в зоне сварки, а благодаря тому, что аргон на 38% тяжелее, чем у воздуха он вытесняет воздух из рабочей зоны, надежно защищая сварочную ванну от контакта с атмосферой» [1]. Применяется для формирования покрытия с повышенными показателями износостойкости и твердости чем у основного металла.

Достоинства: качественный наплавленный слой, чистота процесса.

Недостатки: глубина проплавления, за счет чего возникают трудности в восстановлении изношенных слоев, требователен к подготовке [11,15].

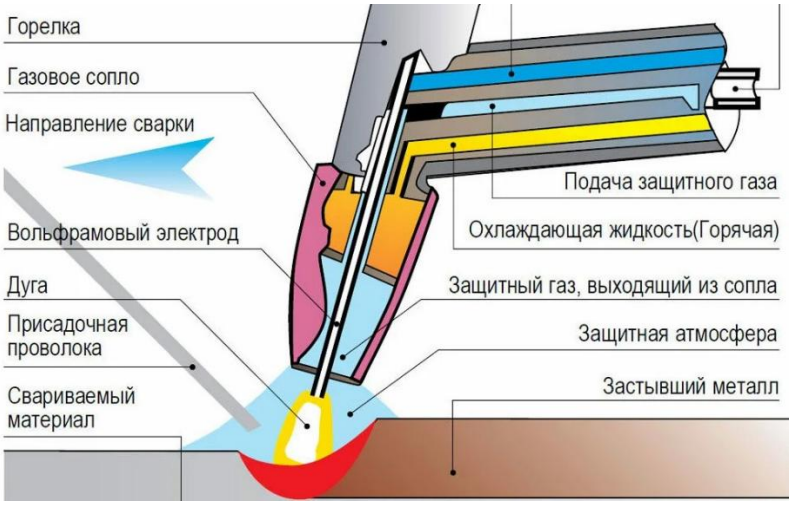

Рисунок 14 – Аргонодуговой процесс наплавки

«Однодуговая наплавка в среде инертного газа. Это процесс наплавки при котором используется одна электрическая дуга, горящая от электродной проволоки к изделию в защитной атмосфере инертного газа .

В качестве защитного газа используют аргон (Ar), который никак не взаимодействует с расплавленным металлом» [4].

Применяется для нанесения интерметаллидного покрытия на основной металл увеличив тем самым механические свойства конструкции. Достоинства: универсальность, простота оборудования. Недостатки: нехватка мощности, формируются хрупкие интерметаллидные фазы [22].

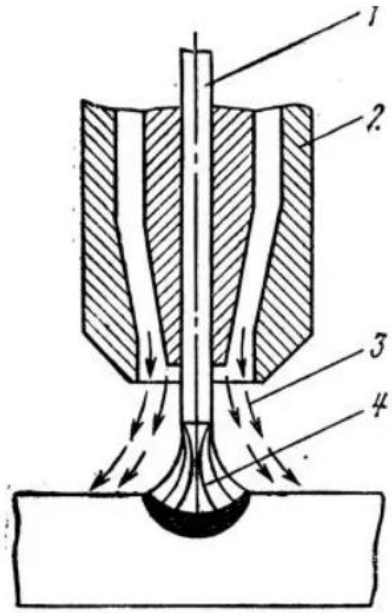

Рисунок 15 – Схема однодуговой наплавки

1 - сварочная проволока; 2 - горелка; 3 - струя защитного газа;

4 - электрическая дуга

Аргонодуговой переплав. Это процесс нагрева поверхности изделия, с последующим расплавлением основного металла, без применения каких-либо присадочных и дополнительных материалов. За счет термического воздействия поверхность приобретает твердую износостойкую структуру,

тем самым повышая поверхностные износостойкие свойства. Достоинства данного способа: можно использовать любое оборудование для Tungsten Inert Gas (TIG) сварки, не требуются дополнительные материалы

Недостатки: возможность перегреть основной материал, неравномерность переплавленного слоя [20].

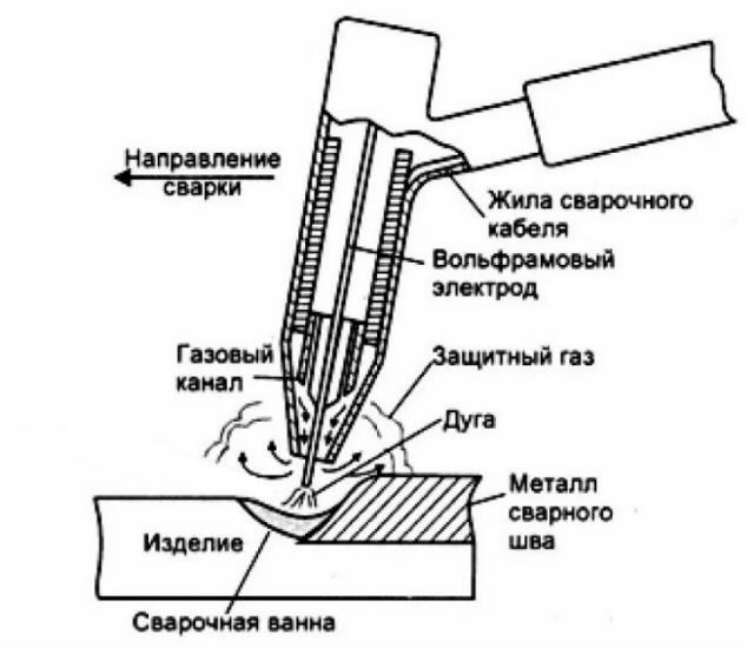

Рисунок 16 – Процесс аргонодугового переплава

Двухдуговой способ наплавки. При данном методе сварки, используются две горелки сконцентрированные в одной точке, из одной горелки подается стальная электродная проволока, из другой- алюминиевая электродная проволока, за счет плавления проволок в сварочной ванне при застывании формируется интерметаллидный сплав из системы железо-алюминий, а также любой другой интерметаллид исходя из материала электродных проволок [27,28,29].

Преимущества данного способа заключаются в маленькой глубине проплавления, что в свою очередь позволяет проводить восстановительные работы несколько раз, проще регулировать химическим составом в

наплавленном покрытии., обширная номенклатура подходящего для способа оборудования, низкая стоимость материалов для наплавки.

Недостатками можно выделить, обильное разбрызгивание, трудность в контролировании процесса.

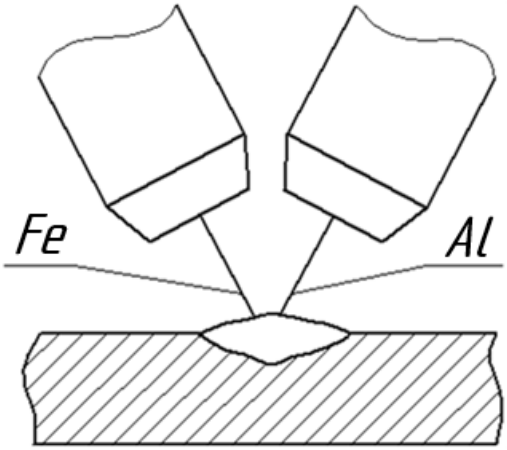

Рисунок 17 – Двухдуговой способ наплавки с использованием электродных проволок

Проанализировав основные способы повышения износостойкости покрытий ГДО, было установлено, что при помощи перечисленных способов можно повысить износостойкость конструкции, однако в ряде случаев, производство запасных деталей или ремонтные работы уже изношенных могут быть как и экономически нецелесообразными или вовсе непригодными к ремонтным и восстановительным работам. Поэтому был выбран двухдуговой способ наплавки. Данным способом можно выполнять как первичные восстановительные работы так и вторичные уже изношенных деталей, а также наплавлять интерметаллидный слой на новые, чтобы улучшить эксплуатационные показатели детали [4].

1.3 Свойства сплавов на основе алюминидов железа

Наибольший интерес представляет система FeAl имеющая несколько интерметаллидов, но в практическом применении вызывают интерес только два: Fe_3Al и FeAl.

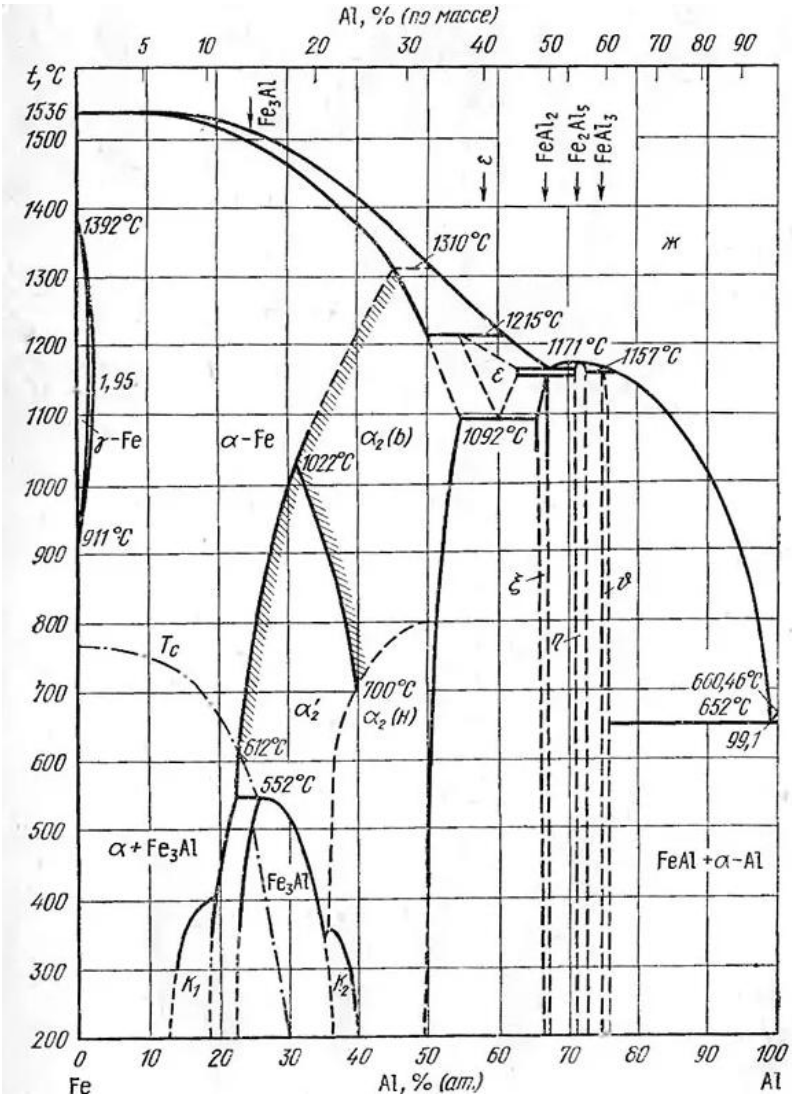

Рисунок 18 – Диаграмма состояния железо-алюминий [1,8,14]

Интересующие для нас фазы отличаются от остальных, химическим составом, а конкретно массой содержащегося алюминия и железа в сплаве, от чего зависят показатели твердости износостойкости и жаростойкости. У выбранных нами интерметаллидов процентные показатели соотношения массы алюминия и железа находятся в диапазоне от 10 до 35 % Al, остальное Fe. У других сплавов масса алюминия преобладает свыше 35% что

непосредственно ведет к повышению хрупкости наплавленного слоя, а также понижению других эксплуатационных показателей [17].

Таблица 3 – Механические и эксплуатационные свойства интерметаллидных фаз Al-Fe

Фаза	Состав (по массе % Al)	Твердость (HV)	Предел прочности (σ_β, МПа) при 20 °С	Пластичность (δ, %)	Температура плавления (°С)	Термостойкость(°С)
Fe_3Al	16	250-400	400-600	2-5	~1540	До 600
FeAl	30	300-500	500-800	<2	~1250	До 1100
$FeAl_2$	65	400-600	300-500	<1	~1150	До 500°
Fe_2Al_5	70	500-700	200-400	<0.5	~1100	До 400°
$FeAl_3$	75	600-800	100-300	<0.2	~1050	До 300°

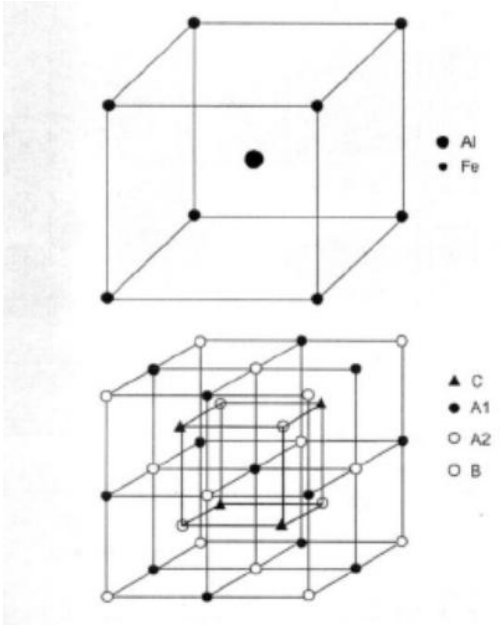

Рисунок 19 – Схематичное расположение атомов для структур B2(верхнее и DO3 (нижнее)

Исходя из данных приведенных выше в таблице можно сделать следующие выводы. Использование сплавов в основе которых сформировались фазы Fe_3Al и FeAl будет целесообразнее, за счет повышенных показателей механических и эксплуатационных характеристик по сравнению с другими интерметаллидами Al-Fe, что в свою очередь благоприятно скажется на увеличении работоспособности главных узлов ГДО которые больше всего подвергаются абразивному износу [1,34,35]. Поэтому для получения нужных интерметаллидных фаз системы железо-алюминий, были сформированы следующие задачи проекта:

1. Разработка методики исследования процессов формирования на стали наплавленных алюминидов железа, их структуры и свойств при двухдуговой наплавке с использованием стальной и алюминиевой электродных проволок.

2. Исследование влияния режимов двухдуговой наплавки на процессы формирования, химический состав и структуру наплавленных алюминидов железа.

3. Исследование влияния химического состава на свойства наплавленных алюминидов железа.

2 Исследование структуры и свойств интерметаллидных сплавов системы железо-алюминий при двухдуговой наплавке

2.1 Методика проведения исследования процессов двухдуговой наплавки

«Исследования наплавки проводились на сконструированной автоматизированной установке для двухдуговой наплавки, состоящей из: рамы, двух направляющих рельс, подвижного портала с закрепляющим и регулируемым механизмом для двух горелок (рисунок 20), а также двух источников питания. При помощи данной установки, мы можем производить двухдуговую наплавку в автоматическом режиме. Портал приводится в движение при помощи блока управления (рисунок 21), также им можно выбирать направление движения и плавно регулировать скорость движения. Дуга зажигается при помощи пульта управления (рисунок 22)» [8].

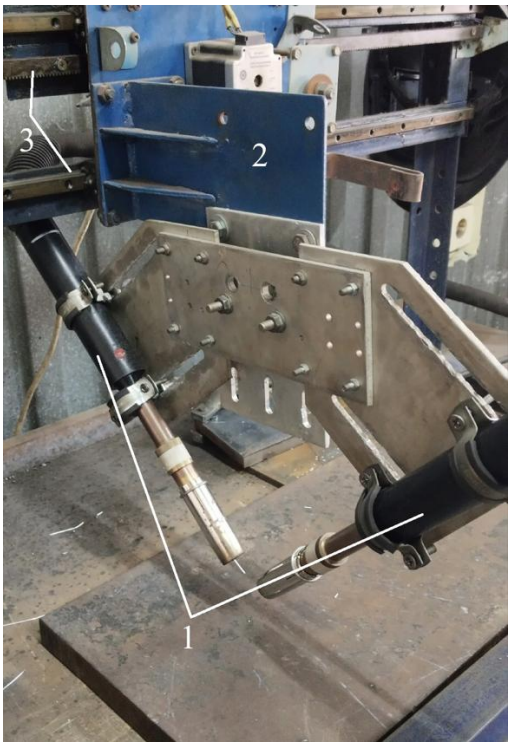

Рисунок 20– Автоматическая двухдуговая установка для наплавки

1-вертикальные горелки; 2- портал; 3- направляющие балки

Рисунок 21 – Блок управления порталом

1 - Тумблер плавной регулировки скорости портала; 2-Дисплей; 3 – кнопки направления движения портала по оси X; 4 – кнопка пуска портала; 5 – кнопка ускорения портала

Рисунок 22 – Пульт управления зажигания дуги

1 – кнопка подачи стальной проволоки; 2 – кнопка подачи алюминиевой проволоки

«Для наплавки использовались две сварочные горелки TBI. Закрепление горелок осуществляется при помощи обжимных хомутов на пластине с отверстиями для линейного перемещения с низким люфтом передвижения, что позволяет настраивать угол наклона горелки, также регулировать длину вылета проволоки. Данный крепежный механизм горелок, стыкуется с пластиной портала, что в свою очередь приводит к его движению» [17].

«Для наплавки использовались образцы из стали марки Ст3 размером 150х130 мм и толщиной 10 мм. В качестве электродных материалов применялась сварочная проволока Св-А7 диаметром 1,2 мм; ER70S-6 (аналог Св-08Г2С) диаметром 1,2 мм (в отличие от отечественного варианта, ER70S-6 имеет незначительно лучший химический состав и тонкое однородное медное покрытие, которое максимально увеличивает электропроводность и защищает провод от коррозии)» [16].

Источниками питания для наплавки использовались пара универсальных сварочных источников Eurotronic MIG TIG 550 I PULS K (рисунок 23) и Megatronic BDH 550 (рисунок 24).

Рисунок 23 – Сварочный полуавтоматический источник питания Eurotronic MIG TIG 550 I PULS K

Рисунок 24 - Сварочный полуавтомат Megatronic BDH 550

«Для нанесения интерметаллидного покрытия на основе Fe-Al, применялись следующего диапазона параметры. Скорость наплавки составляла от 0,9 до 1,5 м/мин. Скорость подачи алюминиевой электродной проволоки от 3-5 м/мин, скорость стальной электродной проволоки составляла 3-4 м/мин, напряжение на дуге для алюминиевой электродной проволоки калибровалось 14-17 В, а для стальной электродной проволоки соответствовало значению в 23,5-27,5 В» [16].

«Геометрические параметры проводили на образцах, прошедших травление в (в 20% растворе HNO_3) разрезанных в поперечном сечении, для более лучшего выявления контуров наплавленного валика. Измерения геометрических показателей наплавленного валика проводились при помощи программы Universal Desktop Ruler, производим настройку масштаба по линейке на фото и приступаем к измерению геометрии валика, ширина

наплавленного слоя (e), высота усиление наплавленного слоя (g), и глубина проплавления наплавленного слоя (h) (рисунок 25)» [15].

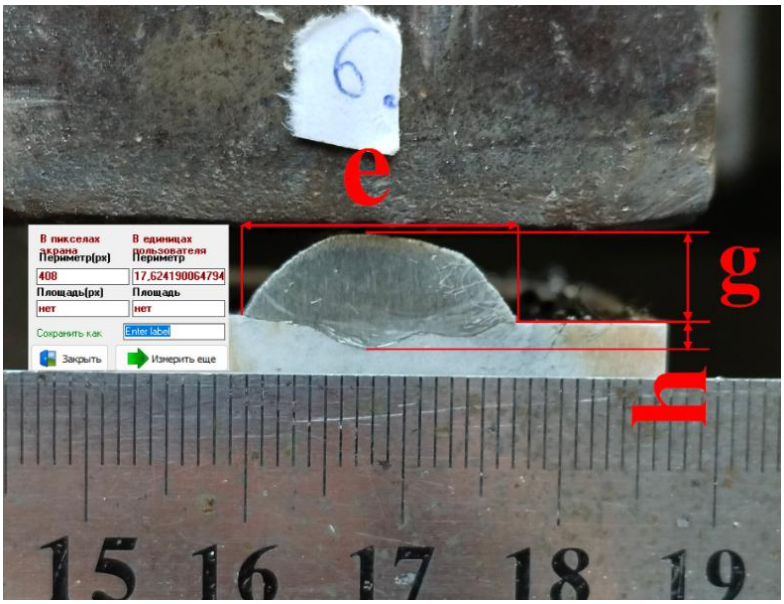

Рисунок 25 – «Схема измерения геометрических параметров наплавленных валиков при помощи программы *Universal Desktop Ruler*» [15]

2.2 Методика исследования химического состава наплавленных покрытий

«Анализ химического состава проводился методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) 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 системой регистрации и анализа дифракции отраженных электронов HKL Premium EBSD System. Образцы для исследований представляли собой шлифованные поверхности поперечного сечения после наплавки валиков на основе железо-алюминий на пластины из стали 20. Из-за недостаточного качества шлифования, для реализации возможности применения методики дифракции обратно-рассеянных электронов, а также достоверного определения элементного

состава наплавленного металла, в различных его областях проводилось химическое травление поверхности шлифования реактивом 3 мл HF + 3 мл HNO_3 + 94 мл H_2O [25]. На рисунке 25 представлена схема выбора точек для определения химического состава наплавленного металла» [16].

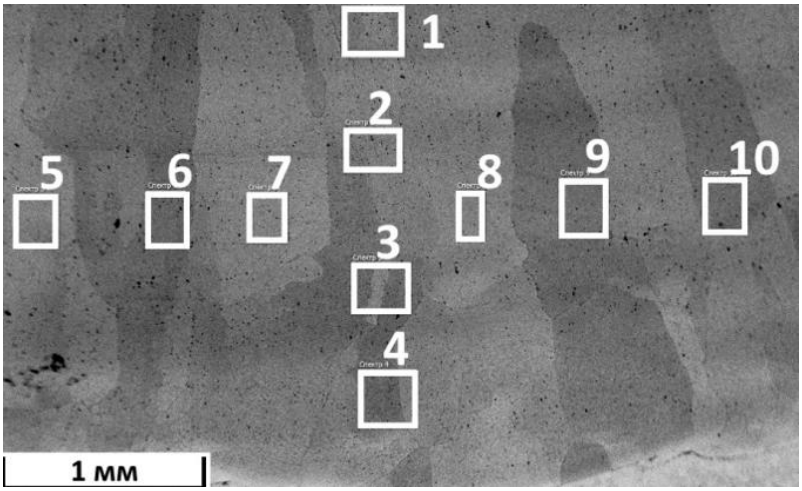

Рисунок 26 - Схема выбора точек для исследования химического состава

«Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance Eco (Bruker AXS GmbH) с вертикальным θ-θ гониометром. Для наплавленных образцов с неровной поверхностью предпочтительнее использовать схему съемки параллельно-лучевой геометрии. Для ее реализации на первичном пучке при использовании линейного фокуса рентгеновской трубки устанавливалось зеркало Гёбеля – многослойная гетероструктура на параболически изогнутой подложке, превращающая расходящийся пучок в параллельный квазимонохроматический с углом расходимости 0,03°. Для усечения «пятна» рентгеновского излучения использовался коллиматор диаметром 1,0 мм. Предварительно место съемки зачищали наждачной бумагой. Съемку исследуемых образцов осуществляли в излучении медного анода (λ=1,54060Å). Напряжение на трубке – 40 кВ, ток накала – 25 мА. Время экспозиции 1 с, шаг сканирования 0,02°. Фокусировка на исследуемом

участке и вывод поверхности образца в центр фокусирующей окружности осуществлялись с помощью системы лазерного наведения. Образцы исследовали на отражение, интенсивность дифракционной картины регистрировали с помощью позиционно-чувствительного детектора SSD160 линейного типа с числом каналов 160. Идентификацию фаз осуществляли в программном обеспечении к дифрактометру Diffrac EVA (version 4.2.1) с использованием лицензионной базы данных Powder Diffraction File-2 (The International Center for Diffraction Data)» [16,37].

Твердость наплавленных валиков будет измеряться по методу Роквелла, пройдя предварительную подготовку, чтобы добиться нужной шероховатости поверхности (рисунок 26). Подготовка образцов и замеры твердости проходили согласно ГОСТ 9013-59. Измерения проводились по шкале HRC, на твердомере ИТБРВ-187,5-А.

Рисунок 27 – Подготовленная поверхность для замера твердости

Рисунок 28 – Твердомер ИТБРВ-187,5-А

Термическую стойкость определяли путем выдержки образцов в печи при температуре (950 °С), через определенный промежуток времени, 100 часов, проводили зачистку от окалины и последующие взвешивание образцов. Таким образом мы выстраивали зависимость потери изначальной массы от времени проведенного образцов при определенной температуре (950 °С).

Для измерения показателей износостойкости был выбран абразивный способ изнашивания о закрепленные абразивные частицы ГОСТ 17367-71, также по нормативным требованиям подготовки образцов по данному ГОСТу были заготовлены образцы. После каждого экспериментального цикла на износостойкость, образцы измеряются и взвешиваются, для формирования более точных результатов. Для расчёта износостойкости мы использовали рассчитывали данные по формуле 1. Эталонным образцом в ряде испытаний будет выступать сталь 45.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_э}{\Delta l_м}, (1)$$

где: ε- относительная износостойкость; $\Delta l_э$- износ эталонного образца; $\Delta l_м$- износ испытуемого образца.

«Испытания на износостойкость будут проводиться при помощи установки ленточного типа, обеспечивающей стабильную и регулируемую нагрузку на испытуемый материал» [16,23,38].

Рисунок 29 – Ленточный станок для испытаний абразивной износостойкости

3 Результаты исследований

3.1 Результаты исследований наплавки интерметаллидных сплавов на основе Fe-Al

3.2.1 Режимы и геометрические показатели

Для получения качественного наплавленного покрытия, мы выбрали широкий диапазон режимов, что позволила выявить более плавную зависимость регулируемых параметров на геометрические показатели наплавленных валиков

Таблица 4 – Режимы наплавки интерметаллидного сплава Fe-Al

Номер опыта	VподAl, м/мин	VподFe, м/мин	Vн,м/мин	UдAl,В	UдFe,В
1	5	5	0,1	22,5	23,5
2	5	5	0,15	22,5	23,5
3	5	5	0,2	22,5	23,5
4	4	5	0,15	22,5	23,5
5	6	5	0,15	22,5	23,5
6	5	5	0,15	20	23,5
7	5	5	0,15	25	23,5

Каждая числовая единица опыта также указывает на нумерацию наплавленных образцов. После проведения ряда наплавочных лабораторных экспериментов, мы получили следующие геометрические параметры 30-32.

Таблица 5 – Геометрические параметры наплавленных образцов

№	Ширина шва (l), мм	Высота шва (h), мм	Проплавление (e), мм
1	17,1	6,4	1,8
2	14	4,7	1,7
3	11,59	3,62	1,1
4	11,62	4	1,4
5	13,3	5	1,6
6	17,3	5,2	2,1
7	12,8	4,9	1,7

Рисунок 30– Внешний вид наплавленного валика №1

Рисунок 31– Внешний вид наплавленного валика №7

Рисунок 32 – Внешний вид наплавленного валика №3

При помощи ряда экспериментов, было установлено, что при использовании данного диапазона параметров, можно добиться равномерного формирования, наплавляемого валика.

3.2.2 Химический состав наплавленных валиков

Химический состав нанесенных покрытий интерметаллидных сплавов на основе Fe-Al колеблется от 9-20% Al, Fe от 71 до 90% (рисунок 32) [8].

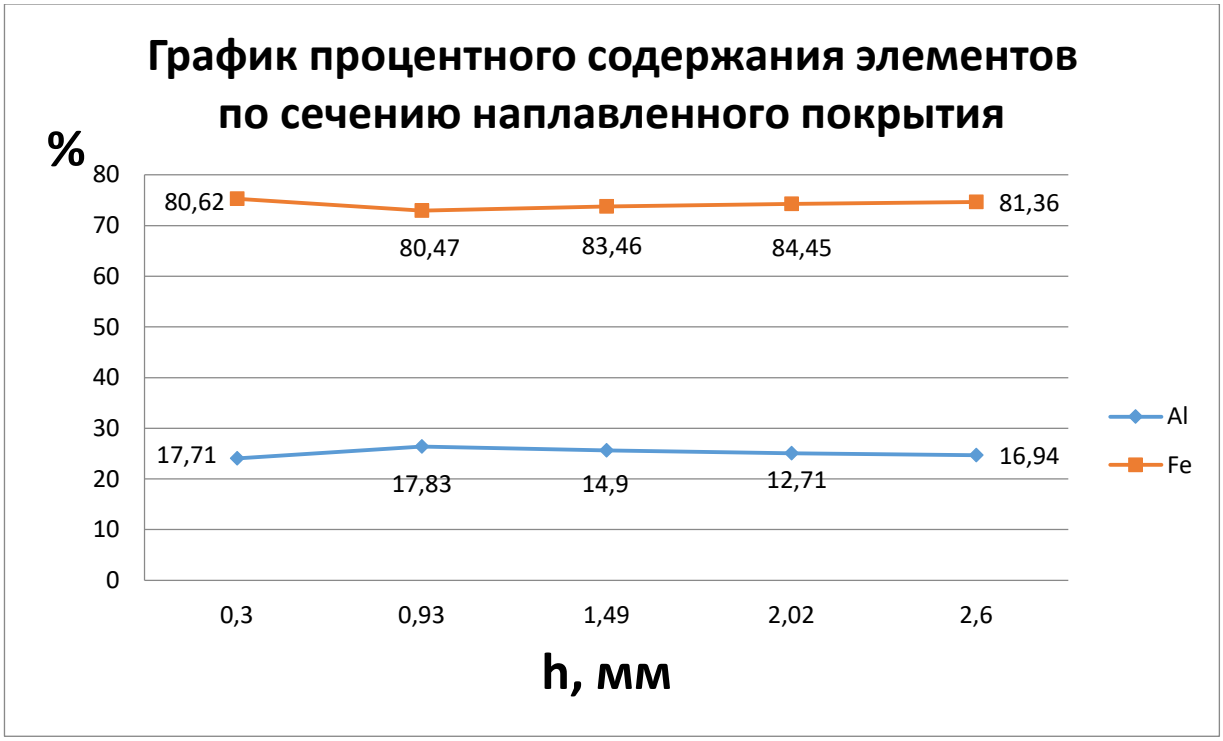

Рисунок 33 – Процентное содержание элементов в образце №2

Анализируя график (рисунок 33), можно отметить то что, смешанность химического состава в сечении валика не превышает 4 %.

3.2.3 Износостойкость

Относительные значения износостойкости валиков варьируются в пределах от 1,5 до 3,33 единиц. Показатели износостойкости пропорционально зависят от содержания алюминия в сплаве Fe-Al, с увеличением алюминия, твердость и износостойкость увеличиваются (рисунок 34) [33].

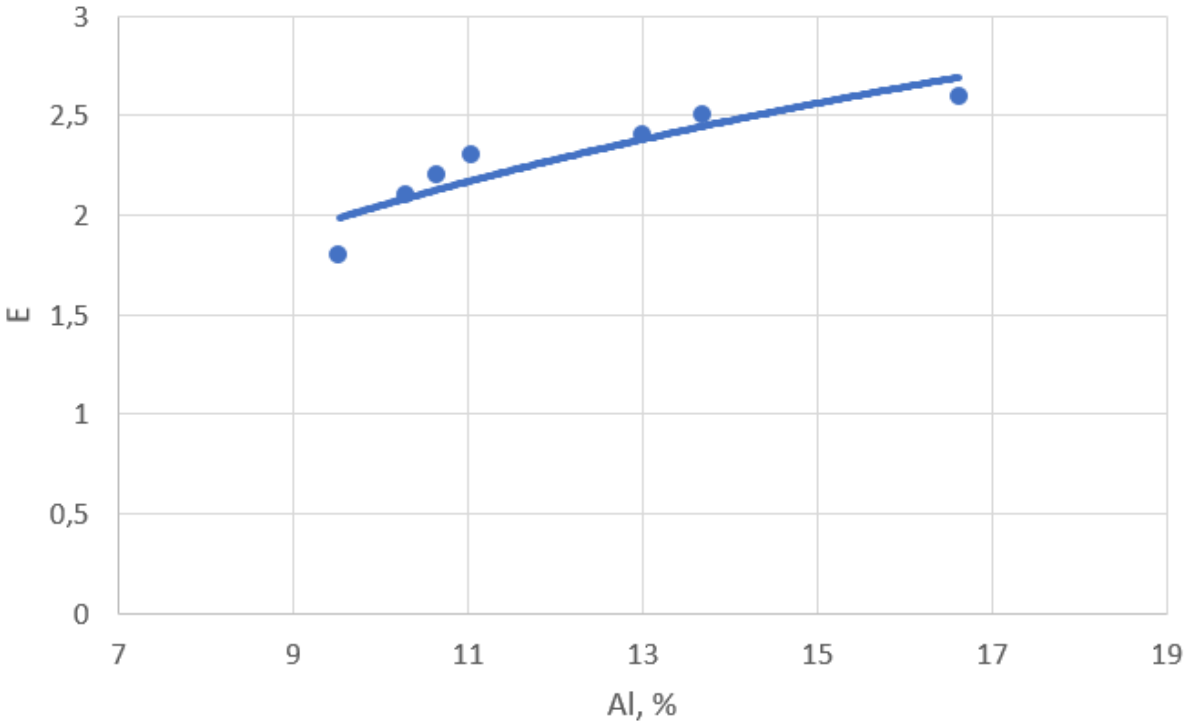

Рисунок 34 – Зависимость износостойкости от содержания алюминия в сплаве

3.2.4 Твердость

Твердость измерялась по всей длине наплавленного слоя, показатели находились в пределах 28-40 HRC (рисунок 34). В зонах где показатели содержания алюминия растут, так же растет и твердость, связано это с формированием новых фаз (FeAl).

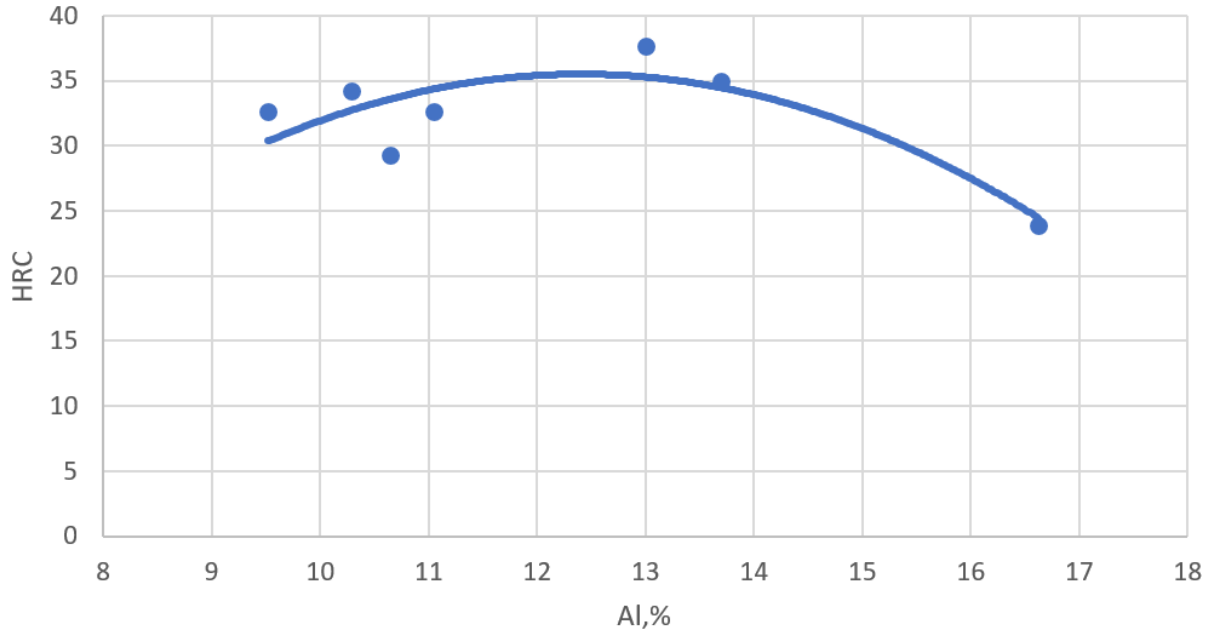

Рисунок 35 – Твердость в зависимости от содержания алюминия

3.2.5 Жаростойкость

«Сущность испытаний жаростойкости заключается в выдержке образцов при определенной температуре на n количество часов, для выявления зависимости изменения массы образцов от времени выдерживания» [17,30].

Испытания проводились в течение 1000 часов при температуре 950 ℃, в печь помещались образцы с разным содержанием алюминия: 1 – 10%, 2 – 14%, 3 – 17%. Анализируя график зависимости (рисунок 36), можно выделить то, что образец с содержанием алюминия ближе к 20% значительно раньше начинает терять массу из-за появления трещин, что значительно снижает показатели жаростойкости [36,30].

Исходя из результатов, можно сделать следующие выводы: при содержании алюминия свыше 20% значительно увеличивает шансы появления мелких и крупных трещин, что в свою очередь уменьшает показатели жаростойкости, оптимальный диапазон массы алюминия в сплаве

от 14 до 20%, образцы с данным процентным содержанием алюминия имеют самую высокую жаростойкость [7].

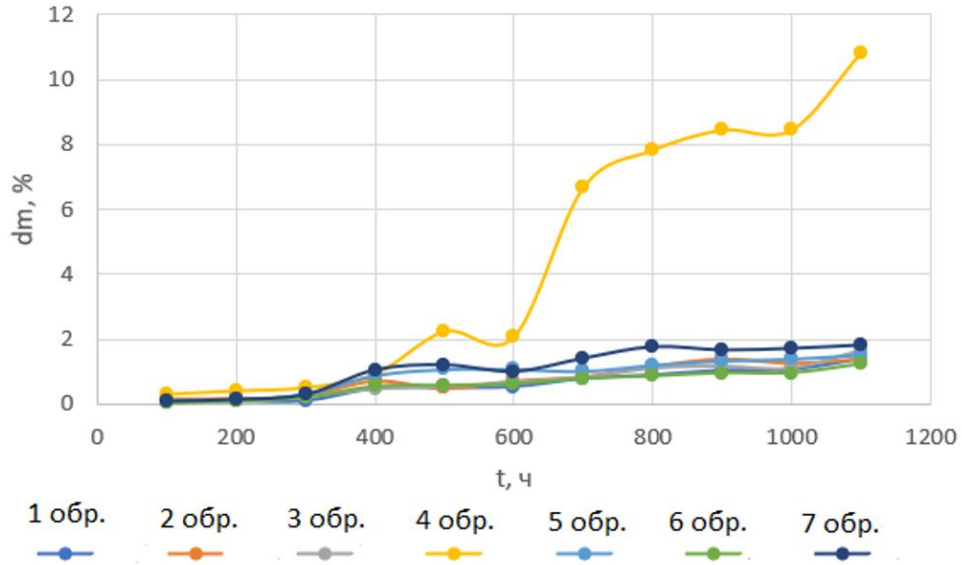

Рисунок 36 – Зависимость массы от времени выдержки образцов при температуре 950℃

4 Предложение по безопасности и экологичности в объектах исследований

Все работы по исследованию нанесения износостойких покрытий на основе алюминидов-железа при помощи двухдугового способа, проводились на кафедре «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы». Тольяттинского государственного университета, схема лабораторного стенда представление желание

4.1 Особенности проектного технологического процесса

В ходе исследования и выполнения выпускной квалификационной работы, были решены вопросы, связанные с повышением качества наплавленного покрытия. Подробно процесс подготовки поверхности для нанесения износостойкой поверхности можно представить в виде пяти этапов. На начальном, первом этапе выполняется механическая подготовка поверхности для наплавки, применением (УШМ) углошлифовальная машинка с кругом для зачистки от разного рода загрязнений (ржавчина, оксидной пленки), а также последующим шлифованием поверхности для уменьшения шероховатости. На втором этапе выполняется очистка поверхности от разного рода масленных загрязнений. На третьем этапе начинается процесс наплавки, для чего применяется сварочное оборудование в виде источников питания, подающих механизмов и сварочных горелок, также применяется инертный газ аргон, для защиты сварочной ванны. На четвертом этапе происходит зачистка наплавленного слоя, от брызг и копоти при помощи зачистных приспособлений. На пятом этапе выполняется контроль качества, при помощи набора (ВИК) визуально-измерительного контроля и дефектоскопа.

Применение предлагаемых технических решений может привести к опасным производственным травмам.

Таблиц 6 - Особенности проектного технологического процесса

Технологическая операция	Персонал выполняющий операцию	Перечень применяемого оборудования
Механическая обработка, зачистка	Слесарь-сборщик	УШМ Sturm AG9012TE Зачистной и лепестковый круг 125мм
Очистка	Слесарь-сборщик	Раствор ацетона C_3H_6O Чистый ветошь
Наплавка	Сварщик-оператор	Сварочный полуавтомат Megatronic BDH 550 Eurotronic MIG TIG 550 I PULS K, электродная проволока Св-А7,ER70S-6 диаметром 1,2 мм, основной материал Ст3, горелка сварочная
Зачистка	Слесарь-сборщик	Щетка металлическая
Контроль качевства	Дефектоскопист	Лупа, УШС-3, спектральный анализ

Особенности выполнения технологических операций представленные в таблице 6 в дальнейшем позволят выявить опасные для жизни и здоровья сотрудника факторы, за счет чего в дальнейшем можно предложить методы предосторожности от них.

4.2 Анализ неблагоприятных и опасных производственных факторов

При выполнении лабораторных исследований, необходимо учитывать возможные угрозы, возникающие из-за влияния вредных производственных условий на лаборантов. В ходе экспериментальной деятельности работники могут сталкиваться с различными рисками для здоровья, вызванными особенностями технологического процесса.

Наибольшую опасность представляют физические аспекты рабочей среды, такие как: ультрафиолетовое излучение, термическое влияние раскаленных поверхностей и перегретого оборудования, а также воздействие электричества высокого напряжения. Дополнительную угрозу несет за собой применение технологических газов, которые при определенных обстоятельствах способны негативно влиять на человеческий организм.

Таблица 7 – Анализ и выявление вредных факторов

Операции	Факторы
Механическая подготовка	Острые кромки, заусенцы, шероховатая поверхность Движущиеся механизмы,УШМ Повышенная запыленность
Обезжиривание	Токсичные пары, огнеопасность
Наплавка	-Повышенные показатели напряжения в электросети -Ультрафиолетовое излучение -Инфракрасное излучение -Повышенная температура оборудования -Высокая загазованность, вредные испарения
Зачистка	-Металлические щетинки, -Движущиеся части оборудования и инструмент, -Повышенная запыленность, -Повышенный шанс вылета окалины из наплавленного слоя
Контроль качества	-Излучение дуги -Загазованность

Решение по выбору защитных средств или устранению выявленных опасных и производственных факторов должно опираться на анализ из таблицы 7 данных.

4.3 Методика и средства для устранения или минимизирования производственных рисков

На основе анализа вредных производственных факторов была подобрана литературная информация (таблица 8), что позволит в практическом применении снизить уровень травматизма рабочей среды.

Таблица 8 – Предлагаемые способы снижения влияния вредных условий на человека

Вредные факторы	Организация мероприятий, обеспечивающих минимизирование вредных или опасных факторов на здоровье сотрудника
Острые кромки, заусенцы, шероховатая поверхность	1)Проведение вводного инструктажа техники безопасности с последующей периодичностью 2)Оснащение работников рабочей одеждой, защищающей от механических и термических воздействий 3) Оснащение рабочего места плакатами и предупреждающими табличками
Движущиеся механизмы, УШМ	1)Проведение вводного инструктажа техники безопасности с последующей периодичностью 2)Оснащение работников рабочей одеждой, защищающей от механических и термических воздействий 3) Оснащение рабочего места плакатами и предупреждающими табличками
Повышенная запыленность и загазованность	1)Предметы индивидуальной защиты от загрязненного воздуха 2)Наличие локальной и общей вентиляции
Повышенные показатели напряжения в электросети	1)Контроль целостности проводки, заземления. 2)Защитное отключение 3)Проведение периодического инструктажа
Ультрафиолетовое излучение, инфракрасное	1)Оснащение работников рабочей одеждой, защищающей от механических и термических воздействий 2) Защитный щеток, экраны

Продолжение таблицы №8

Вредные факторы	Организация мероприятий, обеспечивающих минимизирование вредных или опасных факторов на здоровье сотрудника
Повышенный шанс вылета окалины из наплавленного слоя	1)Оснащение работников рабочей одеждой, защищающей от механических и термических воздействий 2)Защитные очки, щитки

Данные решения таблицы 8, позволят исключить, а также снизить влияние вредных рабочих факторов на здоровье человека, тем самым обеспечить требуемую безопасность при выполнении технологического процесса.

4.4 Пожарная безопасность технологического процесса

Кроме производственных факторов опасности, существует вероятность возникновения пожара. Связано это тем, что наплавочные работы являются главным источником возгорания, за счет раскалённых разбрызгиваний. Для предотвращения возникновения пожара, следует проанализировать опасные факторы теоретического пожара.

Таблица 8 – Выяления классов и опасных факторов пожара

Наименование участка	«Участок сварки и восстановительной наплавки
Наименование оборудования	Оборудование для механической обработки, автоматической наплавки, термической обработки и контроля
Классификация по виду горящего вещества	Пожары, которые происходят за счет воспламенения и горения веществ и материалов на электроустановках, запитанных электрическим напряжением (Е)

Продолжение таблицы №8

Наименование участка	«Участок сварки и восстановительной наплавки
Наименование основных опасных факторов пожара	Повышенная температура воздуха вокруг возгорания; выделение токсичных продуктов горения; снижение видимости; выгорание кислорода
Наименование вторичных опасных факторов пожара	Опасность поражения пострадавших и спасателей электрическим током от технологического оборудования на рассматриваемом производственном участке» [3]

Исходя из полученных данных таблицы 8, возможный пожар на производственном участке относится к классу «Е», что означает горение материалов под напряжением. Основные опасные факторы включают: тепловой поток, разлет искр, высокую температуру, открытое пламя, токсичные продукты горения, задымление и снижение уровня кислорода. Дополнительные риски — повреждение изоляции и электрооборудования, а также отравление персонала химическими веществами, используемыми при тушении. В таблице 9 приведены технические меры для устранения этих опасностей.

Таблица 9 - технические меры для устранения пожарной опасности

Типы оборудование	Наиминование
«Первичные средства пожаротушения	Емкость с песком, переносные углекислотные огнетушители.
Мобильные средства пожаротушения	Специализированные расчеты (вызываются)
Стационарные установки системы пожаротушения	Нет необходимости
Средства пожарной автоматики	Установки пожарной сигнализации, пожарного оповещения
Пожарное оборудование	Пожарный кран
Средства индивидуальной защиты и спасения людей при пожаре	План эвакуации

Продолжение таблицы №9

Типы оборудование	Наиминование
Пожарный инструмент (механизированный и немеханизированный)	Ведро конусное, лом, лопата штыковая
Пожарные сигнализация, связь и оповещение	Кнопка оповещения, звуковые оповещатели, речевые оповещатели, световые оповещатели» [3]

Выше изложенные технические средства и мероприятия позволяют своевременно нейтрализовать негативные факторы, а также максимально снижают риски возникновения пожара и сопутствующих повреждений.

4.5 Мероприятия по экологической безопасности

Современные производственные процессы оцениваются не только с точки зрения охраны труда и пожарной безопасности, но и с учетом их воздействия на окружающую среду. Ужесточение экологических требований обусловлено растущим влиянием промышленности на природу. Антропогенные факторы, такие как загрязнение атмосферы, гидросферы и литосферы, способны привести к серьезным экологическим последствиям.

В соответствии с глобальной экологической повесткой, направленной на сохранение природных ресурсов, необходимо снижать вредное воздействие производства и внедрять меры по защите окружающей среды. В рамках данной работы предложены мероприятия, отражающие экологическую ответственность предприятия

Таблица 10 – Средства и мероприятия по экологической безопасности

Наименование среды	Производственный участок сборки и сварки с установленным на нём технологическим оборудованием
Атмосфера	«Применение специальных фильтров, устанавливаемых в вентиляционную систему цеха, которые позволяют собирать и утилизировать выделяющиеся при работе технологического оборудования вредные вещества» [5]

Продолжение таблицы №10

Наименование среды	Производственный участок сборки и сварки с установленным на нём технологическим оборудованием
Гидросфера	«Контролировать утечки машинного масла из гидравлической системы технологического оборудования, в случае возникновения таких утечек их следует незамедлительно устранять» [5]
Литосфера	«На производственном участке необходимо выполнить установку ёмкостей, которые позволяют провести селективный сбор получаемых при выполнении технологического процесса отходов. Проведение инструктажа персонала о необходимости соблюдения мер по сбору мусора» [5]

Придерживаясь данных мероприятий, можно значительно сократить антропогенное действие производства.

5 Обоснование экономической эффективности предлагаемых в выпускной квалификационной работе

Выпускная квалификационная работа носит научно-исследовательский характер и не предполагает коммерческой выгоды, однако требует экономического обоснования [11,32].

Для выполнения анализа затрат на проведение экспериментов необходимо задать данные для расчета.

Таблица 11 - Исходные данные

Показатель	Условное обозначение	Единица измерения	Проектный вариант
Цена основного материала	Цм	р/кг	68
Дневная ставка участника НИР	См	р	900
Коэффициент премиальных доплат	Кпр	-	1,5
Норма отчислений на социальные нужды	Нсоц	%	30
Суммарная стоимость предоставленного оборудования	Цоб	р	183000
Норма амортизации по применяемому технологическому оборудованию	На	%	24
Мощность оборудования	Моб	кВт	14
Коэффициент полезного действия	КПД	-	0,78
Стоимость электроэнергии	Цэ-э	р	30
Норма отчислений на текущий ремонт оборудования	Н.тр	%	22,9

«Производится расчет экономической эффективности с учетом производственных затрат. Поскольку работа является научно-исследовательской, производственные затраты будут текущими. Формула для расчета взята из методических указаний» [11].

«Расчет текущих затрат производится по следующей формуле» [11].

$$Зтек = зм + ФЗП + Ос.н + Зэ\text{-}э + Зоб + Зпр + НР \quad (1)$$

«где ЗМ - затраты на основные и вспомогательные материалы» [11].

«ФЗП - фонд заработной платы (основная и дополнительная заработная плата научно– технического персонала» [11].

«Ос.н - отчисления на социальные нужды» [11].

«Зэ-э - затраты на электроэнергию для выполнения исследований» [11].

«Зоб - затраты, связанные с эксплуатацией оборудования» [11].

«Зпр - прочие затраты, в которые входит аренда помещений, приобретение образцов или макетов» [11].

«НР - накладные расходы (расходы на оплату работы управленческого персонала и охрану труда)» [11].

«Затраты на основной и вспомогательный материал вычисляются по следующей формуле:» [11].

$$ЗМ = ЗМосн + ЗМвсп \quad (2)$$

«ЗМосн - затраты на основной материал» [11].

«ЗМвсп - затраты на вспомогательный материал» [11].

«Затраты на основной материал рассчитываются по формуле:» [11].

$$ЗМосн = Нр + Цм + U, \quad (3)$$

«где Нр - норма расхода основного материала на 1 образец для испытаний» [11].

«Цм - оптовая цена 1 кг основного материала» [11].

«U - количество образцов,шт» [11].

«Затраты на вспомогательный материал принимаем равными 20% от затрат на основной материал:» [11].

$$ЗМвсп = 0{,}2 \cdot ЗМосн \quad (4)$$

В процессе формирования экономической главы выпускной квалификационной работы, были проведены анализы интернет-источников, откуда была взята информация, что стоимость 1 кг стали марки Ст3 равна 68 рублей.

Также цена одной 5 килограммовой катушки присадочной проволоки марки ER70S-6 равняется 1300 рублей.

$$ЗМосн = 0.65 \cdot 68 \times 7 = 309.4 \text{ руб}$$

$$ЗМвсп = 0.2 \cdot 309.4 = 61.88 \text{ руб}$$

$$ЗМ = 309.4 + 61.88 = 371.28 \text{ руб}$$

«Затраты на заработную плату научно– технического персонала:» [11].

$$ФЗП = ЗПЛосн + ЗПЛдоп \quad (5)$$

«ЗПЛосн - основная заработная плата научно–технического персонала» [11].

«ЗПЛдоп - дополнительная заработанная плата научно - технического персонала» [11].

«Основная заработная плата вычисляется по формуле:» [11].

$$ЗПЛосн = \Sigma Траб \cdot Сд \cdot Кпр \cdot И \quad (6)$$

«ΣТраб− суммарное время работы каждого участника НИР по всем этапам (в днях)» [11].

«Сд − дневная ставка каждого участника НИР, руб.» [11].

«Кпр − коэффициент премиальных доплат (можно принять =1,5)» [11].

«И− количество исполнителей на каждом этапе, чел» [11].

«Дополнительная заработная плата определяется по формуле:» [11].

$$ЗПЛдоп = 0{,}1 \cdot ЗПЛосн \quad (7)$$

$$ЗПЛдоп = 0.1 \cdot 6750 = 675 \text{руб}$$

$$ФЗП = 6750 + 675 = 7425 \text{руб}$$

«Отчисления на социальные нужды вычисляем по формуле:» [11].

$$Ос.н = \frac{Нсоц \cdot ФЗП}{100} \quad (8)$$

«где Нсоц - норма отчислений на социальные нужды = 30%» [11].

$$Ос.н = \frac{Нсоц \cdot ФЗП}{100}$$

«Затраты на электрическую энергию для проведения испытаний:» [11].

$$Зэ - э = \frac{Моб \cdot tисп}{\eta} Цэ - э \ (9)$$

«где Моб - мощность оборудования (14 КВт)» [11].

«tисп - время проведения испытаний, час» [11].

«ή - коэффициент полезного действия оборудования (0,85)» [11].

«Цэ-э - цена 1 кВт·часа электроэнергии = 5,04 руб.» [11].

$$\frac{14 \cdot 2}{0{,}78} \cdot 5.04 = 180.92$$

«Затраты, связанные с эксплуатацией оборудования:» [11].

$$Зоб = Аоб + Рт.р \ (10)$$

$$176.6+84.3=260.9 \text{ руб}$$

«где Аоб - амортизационные отчисления, связанные с эксплуатацией оборудования» [11].

«Рт.р - расходы на текущий ремонт оборудования» [11].

«Затраты на амортизацию оборудования определяем по формуле:» [11].

$$Аоб = ΣЦоб \cdot \frac{На \cdot tисп}{Фэф \cdot 100} \ (11)$$

«где На - норма амортизации по применяемому технологическому оборудованию, 24 %» [11].

«ΣЦоб - суммарная цена оборудования, необходимого для проведения испытаний, руб.» [11].

«Фэф - эффективный фонд времени работы оборудования (можно принять равным 1984 часа)» [11].

«tисп - время проведения испытаний, час» [11].

«Стоимость оборудования, которое использовалось приведены в таблице 12» [11].

«Таблица 12 - Наименование и цены предоставленного оборудования» [11].

Наименование оборудования	Цена (руб.)
Горелки AUT 401/501D	20000
Источник №1 Eurotronic MIG TIG 550 I PULS K	370000
Источник №2 Megatronic BDH 550	340000

$$Аоб= 730000\frac{24 \cdot 2}{1984 \cdot 100} = 176.6$$

«Расходы на ремонт оборудования:» [11].

$$\Sigma Цоб \cdot \frac{Нт.р \ \cdot \ кз}{Фэф \cdot 100} (12)$$

«где Нр – норма отчислений на текущий ремонт оборудования (принимаем равный 35%)» [11].

«Кз − коэффициент загрузки оборудования» [11].

$$Кз = \frac{nоб.расчет}{nоб.прин} (13)$$

$$Кз = \frac{1}{1}$$

$$Ртр =730000 \frac{22,9 \cdot 1}{1984 \cdot 100} = 84.3$$

Зоб = 176.6+84.3=260.9 руб

«Прочие затраты, в которые входит аренда помещений, приобретение образцов, принимаем в размере 5% от величины фонда заработной платы научно – технического персонала:» [11].

$$Зпр = 0,05 \cdot ФЗП \quad (14)$$

$$Зпр = 0.05 \cdot 7425 = 371.25 руб$$

«Накладные расходы (расходы на оплату работы управленческого персонала и на охрану труда) принимаем в размере 55% от величины фонда заработной платы научно – технического персонала:» [11].

$$НР = 0,55 \cdot ФЗП \quad (15)$$

$$НР = 0.55 \cdot 7425 = 4083.75 руб$$

В исследовательской лаборатории присутствует все необходимое оборудование, предоставленное кафедрой, поэтому дополнительные субсидии на приобретение оборудования не требуется.

Проведен анализирующий расчет финансовых затрат на исследование двухдугового способа нанесения интерметаллидных покрытий.

Итоговые результаты продемонстрированы в таблице 13

Таблица 13 – Основные затраты на проведение лабораторных исследований

Наименование статей затрат	Сумма, руб.
Затраты на материал	309.4
Фонд заработной платы	7425
Отчисления на социальные нужды	2227,5
Затраты на электрическую энергию для проведения испытаний	166
Затраты на оборудование	176.6
Прочие затраты	371,25
Накладные расходы	4083,75
Общие затраты на проведение работы	14760

Заключение

В ходе выполнения настоящей выпускная квалификационная работа с посвящена исследованию структуры и свойств интерметаллидных сплавов системы железо-алюминий, а также повышение показателей стойкости при двухдуговой наплавке были достигнуты следующие результаты:

Проведен обзорный анализ применяемых материалов и методов повышения износостойкости деталей ГДО. Установлено, что интерметаллидные сплавы системы Fe-Al обладают высокими показателями твердости, износостойкости и жаростойкости, что делает их перспективными для применения в условиях абразивного износа.

Разработана методика двухдуговой наплавки с использованием стальной (ER70S-6) и алюминиевой (Св-А7) электродных проволок. Определены оптимальные режимы наплавки, включая скорость подачи проволоки, напряжение на дуге и скорость наплавки, обеспечивающие формирование качественного покрытия.

По разработанной методике были проведены лабораторные испытания, валик наплавлялся на предварительно подготовленные образцы из стали марки Ст3 с габаритными размерами,150х130 мм и толщиной 10 мм.

Проведены исследования геометрических параметров, химического состава, твердости, износостойкости и жаростойкости наплавленных покрытий. Установлено, что: содержание алюминия в сплаве варьируется от 9 до 20%, что влияет на формирование интерметаллидных фаз Fe_3Al и FeAl. Твердость наплавленного слоя достигает 24–40 HRC, а износостойкость превышает показатели эталонной стали 45 в 1,5–3,33 раза.

Оптимальное содержание алюминия для жаростойкости составляет 14–20%, при котором минимизируется риск образования трещин, за счет чего ресурс работы при высоких температурах повысеться.

Разработаны мероприятия по обеспечению безопасности труда и минимизации воздействия на окружающую среду. Предложены меры защиты

от вредных факторов, такие как использование средств индивидуальной защиты, вентиляции и систем пожаротушения.

Также проведен расчет затрат на проведение исследований, включая стоимость материалов, оборудования и заработной платы. Общая сумма затрат составила 14 760 рублей, что подтверждает экономическую целесообразность предлагаемой технологии.

Результатом настоящей квалификационной работы стали итоги проведенных исследований, что подтверждают эффективность применения данного способа повышения износостойкости деталей ГДО, а именно сито грохота. Однако данная технология может найти свое применение не только в ГДО, но и в других отраслевых сферах производства, таких как, авиационная промышленность, машиностроение, космическая отрасль, что поспособствует дальнейшему распространению, а результаты, полученные в ходе испытаний и исследований в различных областях, обеспечат развитие данной технологии.

Список используемой литературы

1. Банных О.А., Дрица М.Е. (ред.) Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: Справочник. — М.:Металлургия, Москва 1986. – 224 с.
2. Башнин Ю.А. Электродуговая металлизация в промышленности. — СПб.: Недра, 2005. – 100 с.
3. Белов С. В. Охрана окружающей среды. М. : Машиностроение, 1990.
4. Бочкарев, А. Г. Исследование процессов наплавки жаростойких покрытий системы железо-алюминий // Репозиторий Тольяттинского государственного университета. URL: https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/4604 (Дата публикации 2017).
5. Горина Л. Н. Обеспечение безопасных условий труда на производстве: учебное пособие. Тольятти : ТолПИ, 2000. 68 с.
6. Гуляев А.П. Лазерные технологии в машиностроении. — М.: Машиностроение, 2015. – 320 с.
7. Гуляев А.П. Термическая обработка стали. — М.: Металлургия, 1986.- 544 с.
8. Зюбин, Д. В. Новая методика определения химического состава наплавленного металла при дуговой сварке // Репозиторий Тольяттинского государственного университета. URL: https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/3093 (Дата публикации 2017).
9. Ковтунов А. И., Мямин С. В., Цымбал Р. А. Разработка технологии жидкофазного алитирования деталей оборудования для изготовления кирпича //Тяжелое машиностроение. – 2014. – №. 2-3. – С. 34-36.

10. Ковтунов, А.И., Бочкарев А.Г., Семистенов Д.А. Аргонодуговая наплавка интерметаллидных сплавов системы титан-алюминий: монография. Тольятти: НаукоПолис, 2024. 189 с.

11. Краснопевцева И.В. Методическое пособие по выполнению экономической части дипломного проекта производственно технологического характера для студентов специальности 150700.02.65 и направления подготовки 15.03.01 / И. В. Краснопевцева. –Тольятти: ТГУ, 2015. –С.3– 22.

12. Кудрявцев В.В. Высокоскоростное газопламенное напыление (HVOF). — М. Машиностроение, 2010. – 84 с.

13. Лахтин Ю.М. Химико-термическая обработка металлов. — М.: Машиностроение, 1985.359 с.

14. Лякишева Н.П Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т.1/Под общ. ред. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с.

15. Неметулла М.М. восстановление деталей сельскохозяйственной техники высокоскоростной аргоно-дуговой наплавкой. Челябинск – 2012. – 39 с.

16. Плахотный, Д. И. Исследование процессов формирования и свойств постоянных покрытий литейных металлических форм на основе алюминидов никеля и железа // Репозиторий Тольяттинского государственного университета. URL: https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/8791 (Дата публикации 2018).

17. Сорокин, В. Г., Волосникова, А. В., & Вяткин, С. А. (1989). Марочник сталей и сплавов.

18. Стародубцев, А. Д. Формирование износостойких покрытий методом напыления сжатой дугой// Репозиторий Тольяттинского государственного университета. URL: https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/817 (Дата публикации 2016).

19. Трегубов Н.М., Ремонт Горных Машин/ Н.М. Трегубов, Л.Ф. Акастелов Москва «Недра» 1978. 109 с.

20. Третьяков А.В. Вакуумно-дуговой переплав металлов и сплавов -М.: Металлургия, 1985. — 320 с.

21. Федоренко И.М. Защитные покрытия металлов. — Киев: Наукова думка, 1992. – 202 с.

22. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление/Пер. с яп. Х12 В. Н. Попова; Под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. - М.: Машиностроение, 1985.- 240 с., ил.

23. Белюк Ч. И., В. Е. Панин, В. Г. Дураков, Г. А. Прибытков, Н. Г. Ремпе Электронно-лучевая наплавка в вакууме: оборудование, технология, свойства покрытий Сварочное производство, 2000, № 2 с. 34–38.

24. Чёсов Ю. С., Зверев Е. А., Вахрушев Н. В. Исследование структуры износостойких плазменных покрытий из механических смесей //Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – №. 2. – С. 96-105.

25. Arif Z. U. et al. Laser deposition of high-entropy alloys: a comprehensive review //Optics & Laser Technology. – 2022. – Т. 145. – С. 107447.

26. Biryukov V. P. Optimization of Laser Surfacing Technology and Its Effect on Coating Properties //Photonics Russia. – 2023. – Т. 17. – №. 6. – С. 442-452.

27. de Sousa Malafaia, A.M., Maestro, C.A.R., de Oliveira, M.F. Alternative air induction melt–remelt processing of an Fe_3Al–C intermetallic alloy: part II – high temperature cyclic oxidation behavior // International Journal of Metalcasting. 2022. P. 1673-1680. DOI: 10.1007/s40962-022-00881-y.

28. de Sousa Malafaia, A.M., Maestro, C.A.R., de Oliveira, M.F. Alternative air induction melt–remelt processing of an Fe3Al–C intermetallic alloy: part I — mechanical properties and the effects of loading rate, heat treatment and test temperatures // International Journal of Metalcasting. 2022. Vol. 16, P. 1265–1275. DOI: 10.1007/s40962-021-00679-4.

29. de Sousa Malafaia, A.M., Maestro, C.A.R., de Oliveira, M.F. Alternative air induction melt–remelt processing of an Fe3Al–C intermetallic alloy: part II – high temperature cyclic oxidation behavior // International Journal of Metalcasting. 2022. P. 1673-1680. DOI: 10.1007/s40962-022-00881-y.

30. Deevi S.C. Advanced intermetallic iron aluminide coatings for high temperature applications // Progress in Materials Science. 2021. Vol. 118 P. 100769. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100769.

31. Isagulov A.Z., Kwon S.S., Kulikov V.Yu. Increasing the wear resistance of mining and processing equipment elements

32. Kazhikenova S. S. // Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information. 2020. No. 6. P. 609-613.

33. Kumar A., Nayak S.K., Laha T. Comparative study on wear and corrosion behavior of plasma sprayed Fe73Cr2Si11B11C3 and Fe63Cr9P5B16C7 metallic glass composite coatings // Journal of Thermal Spray Technology. 2022. Vol. 32. P. 1302-1316. DOI: 10.1007/s11666-021-01280-1.

34. Metidji N., Younes A. Effects of boron, nickel and molybdenum content on the microstructure, mechanical behaviour and wear properties of FeAl alloy made by vacuum arc melting // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2022. Vol. 75, P. 2691-2699. DOI: 10.1007/s12666-022-02639-w.

35. Metidji N., Younes A., Allou D. et al. Effect of zirconium of the corrosion behavior of FeAl40Ti3B intermetallic compounds for use in solar

water heaters // Journal of Applied Electrochemistry. 2024. Vol. 54, P. 1267-1277. DOI: 10.1007/s10800-023-02033-4.

36. Moszner F., Peng J., Suutala J. et al. Application of iron aluminides in the combustion chamber of large bore 2-stroke marine engines // Metals. 2019. Vol. 9, No. 8: 847. DOI: 10.3390/met9080847.

37. Peng Y. S. et al. Numerical investigation on performance of ultra-thin GaAs solar cells enabled with frontal surface pyramid array //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2022. – Т. 55. – №. 24. – С. 245105.

38. Ravi K., Batra U., Prakash U. Investigation of mechanical and wear characteristics of forged Fe-Al-C intermetallic quaternary alloyed with Zr/Ti // Journal of Materials Engineering and Performance. 2021. Vol. 31, P. 3127 - 3135. DOI: 10.1007/s11665-021-06424-6.

39. Wallerstein D. et al. Recent developments in laser welding of aluminum alloys to steel //Metals. – 2021. – Т. 11. – №. 4. – С. 622.