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 процессов двухдуговой наплавки интерметаллидных сплавов системы железо-алюминий

Обучающийся И.В. Веденеев
(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

Данная выпускная квалификационная работа посвящена исследованию процессов двухдуговой наплавки интерметаллидных сплавов системы железо-алюминий с целью повышения качества формирования износостойких покрытий. Работа охватывает широкий спектр аспектов, начиная с анализа свойств алюминидов железа и заканчивая разработкой методики исследования наплавки.

В первой части работы сделан обзор существующих методов нанесения покрытий, таких как горячее изостатическое прессование, вакуумное конденсационное напыление, газопламенное и плазменное напыление, а также лазерная наплавка. Рассматриваются преимущества и недостатки каждого из методов, выделены их основные характеристики и ограничения.

В ходе исследования была выбрана двухдуговая наплавка как перспективный метод, обеспечивающий высокую производительность и возможность получения покрытий с заданными геометрическими параметрами. Разработан комплексный подход к исследованию влияния различных режимов наплавки (например, силы тока, напряжения, скорости подачи проволоки, угла наклона горелки) на структуру и свойства покрытий.

Экспериментальная часть работы включает анализ процессов формирования наплавленных валиков, а также их геометрических параметров и сварочно-технологических свойств. На основе проведённых экспериментов были выявлены оптимальные диапазоны параметров, обеспечивающие стабильный процесс и минимизацию дефектов в получаемых покрытиях.

Работа завершается экономическим анализом, который демонстрирует целесообразность внедрения разработанных решений, с акцентом на снижение эксплуатационных затрат и доступность оборудования.

Annotation

This final thesis is devoted to the study of the processes of double-arc surfacing of intermetallic alloys of the iron-aluminum system in order to improve the quality of the formation of wear-resistant coatings. The work covers a wide range of aspects, starting with the analysis of the properties of iron aluminides and ending with the development of a methodology for the study of surfacing.

In the first part of the work, an overview of existing coating methods is made, such as hot isostatic pressing, vacuum condensation spraying, flame and plasma spraying, as well as laser surfacing. The advantages and disadvantages of each method are considered, their main characteristics and limitations are highlighted.

In the course of the study, two-arc surfacing was chosen as a promising method that provides high productivity and the ability to obtain coatings with specified geometric parameters. A comprehensive approach has been developed to study the effect of various surfacing modes (for example, current strength, voltage, wire feed rate, burner angle) on the structure and properties of coatings.

The experimental part of the work includes an analysis of the processes of formation of deposited rollers, as well as their geometric parameters and welding-technological properties. Based on the experiments carried out, optimal ranges of parameters were identified that ensure a stable process and minimize defects in the resulting coatings.

An important part of the work was the analysis of the safety and environmental friendliness of the technological process, which proposed measures to reduce risks to the health of employees and minimize the negative impact on the environment. The issues of labor protection and fire safety are considered.

The work ends with an economic analysis that demonstrates the feasibility of implementing the developed solutions, with an emphasis on reducing operating costs and availability of equipment.

Содержание

Введение 6

1 Анализ свойств и методов нанесения алюминидов железа 7

1.1 Разбор диаграммы состояния 7

1.2 Способы нанесения алюминидов железа с анализом их достоинств и недостатков 8

1.3 Влияние параметров на формирование наплавленного металла 19

2 Методика исследования процессов двухдуговой наплавки интерметаллидных сплавов системы железо-алюминий 25

2.1 Исследование процессов формирования 25

2.2 Методика исследования геометрических параметров наплавленных валиков 29

3 Результаты исследования процессов двухдуговой наплавки алюминидов железа 31

3.1 Подбор и обоснование режимов наплавки 31

3.2 Влияние режимов наплавки на сварочно-технологические свойства 32

3.3 Влияние режимов наплавки на геометрические параметры наплавленных сплавов 33

4 Предложение по безопасности и экологичности в объектах исследований 46

4.1 Особенности проектного технологического процесса 46

4.2 Анализ неблагоприятных и опасных производственных факторов 47

4.3 Методика и средства для устранения или минимизирования производственных рисков 48

4.4 Обеспечение пожарной безопасности электроустановок 50

4.5 Экологическая экспертиза разрабатываемого объекта 50

4.6 Мероприятия по экологической безопасности 50
4.7 Экологическое управление 51
5 Экономическая эффективность проекта 52
Заключение 58
Список используемой литературы 60

Введение

Алюминиды железа были одними из наиболее изученных интерметаллидов с 1930-х годов, когда была замечена их превосходная устойчивость к окислению. Алюминиды железа активно применяются в: авиационной промышленности, энергетическом машиностроении, энергетических установках, машиностроении, а так же в качестве материалов, заменяющие дорогие аналоги.

В ходе изучения был выявлен ряд положительных свойств, таких как: высокая стойкость, высокое сопротивление коррозии, высокая износостойкость, низкий удельный вес, а так-же низкая стоимость. Но хрупкость при низких температурах является главным недостатком для использования в качестве конструкционных материалов.

В данный момент интерметаллидные сплавы системы алюминий железо можно получить, используя следующие методы: горячее изостатическое прессование и спекание в вакууме, дуговое, а так же плазменное напыление, лазерная, электродуговая наплавка и др. Широким распространением в нанесении интерметаллидов системы алюминий-железо является наплавка за счет повышенной производительности способа нанесения и достаточной толщины покрытия для работы в качестве износостойкого или жаростойкого покрытия для многих областей промышленности, а так же низкой стоимости по сравнению с другими способами нанесения.

На основе проведенного анализа была сформулирована цель работы: повышение качества формирования наплавленных слоев на основе алюминидов железа за счет исследования характеристик двухдуговой наплавки.

1 Анализ свойств и методов нанесения алюминидов железа

1.1 Разбор диаграммы состояния

Рассмотрим диаграмму состояния железо-алюминий (рисунок 1)

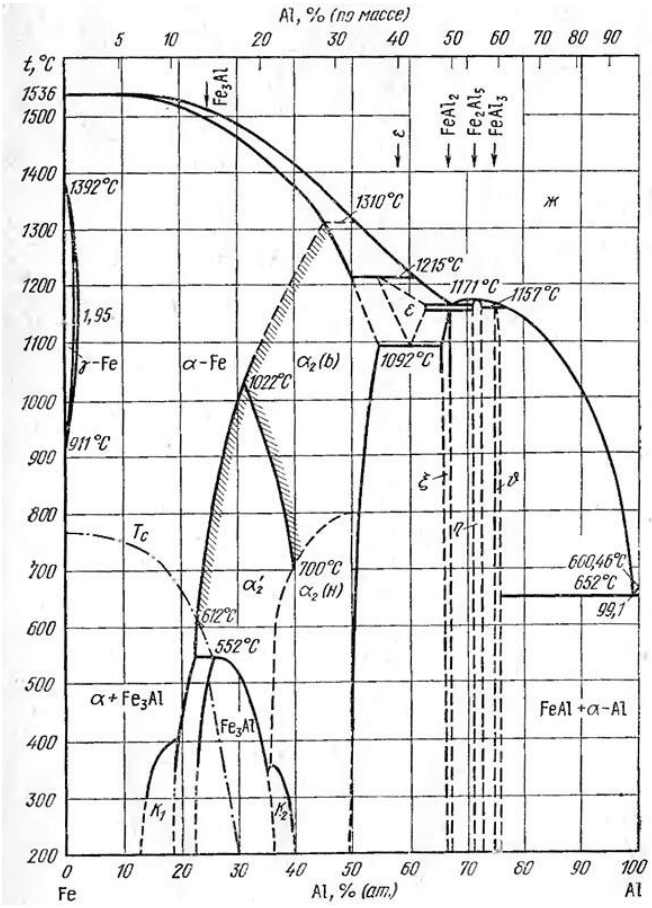

Рисунок 1 – Диаграмма состояния железо-алюминий [24]

Диаграмма состояния характеризуется наличием нескольких металлических соединений: Fe3Al, FeAl2, Fe2Al5, FeAl3, которые образуются с увеличением содержания железа в сплаве свыше (1.58%) [34, 37].

«Наибольший интерес представляют фазы Fe3Al, FeAl за счет лучшего комплекса механических и эксплуатационных свойств по сравнению с другими соединениями системы железо-алюминий. Fe3Al образуется в сплавах с содержанием алюминия от 25%-34%» [17, 34].

1.2 Способы нанесения алюминидов железа с анализом их достоинств и недостатков

Для нанесения интерметаллидных сплавов применяют различные способы наплавки, такие как: горячее изостатическое прессование, вакуумное конденсационное нанесение покрытий, газопламенное напыление, плазменное напыление, лазерная наплавка, а так же двухдуговая наплавка.

1.2.1 Горячее изостатическое прессование

Горячее изостатическое прессование (ГИС) - это процесс уплотнения порошков или литой и спеченных частей в печи при высоком давлении (100-200 МПа) и при температуре от 900 до 1250 ° С, например, для сталей и супер сплавов. Давление газа действует равномерно во всех направлениях, чтобы обеспечить изотропические свойства и 100% уплотнение (рисунок 2) [1].

Он обеспечивает много преимуществ и стало жизнеспособной и высокопроизводительной альтернативой обычным процессам, таким как ковка и литье.

Широкий спектр типов компонентов может быть изготовлен благодаря ГИС. Его возможности включают в себя крупные и массивные металлические компоненты вблизи чистой формы, такие как нефтегазовые детали весом до 30 тонн, или буйство из чистой формы диаметром до одного метра. Или даже очень крошечные детали, такие как стоматологические кронштейны. В результате ГИП развивался на протяжении многих лет, чтобы стать высокопроизводительным, высококачественным и экономически эффективным процессом для производства многих металлических (или керамических) компонентов.

Горячее изостатическое прессование (ГИС) — это высокотехнологичный процесс, сочетающий высокую температуру и

равномерное давление для уплотнения материалов, устранения дефектов и улучшения их свойств. Он эффективно устраняет внутренние поры, трещины и другие дефекты, повышая плотность и однородность материала. Благодаря равномерному давлению со всех сторон, ГИС обеспечивает изотропные свойства, что делает материал одинаково прочным во всех направлениях. Этот процесс значительно улучшает механические характеристики, такие как прочность, усталостная стойкость, долговечность, а также коррозионная и термическая стойкость [2, 53, 12].

ГИС позволяет обрабатывать детали сложной геометрии, включая как крупногабаритные изделия, например, нефтегазовые компоненты весом до 30 тонн, так и миниатюрные изделия, такие как стоматологические кронштейны. Технология подходит для широкого спектра материалов, включая металлы (титановые, никелевые сплавы, стали), керамику, композиты и порошковые материалы. Она также снижает отходы, так как позволяет создавать детали, близкие к чистовой форме, минимизируя необходимость дополнительной механической обработки. Благодаря этим преимуществам, ГИС широко применяется в высокотехнологичных отраслях, таких как аэрокосмическая, медицинская, энергетическая и нефтегазовая промышленность [54].

Однако у ГИС есть и недостатки. Оборудование для этого процесса требует значительных капиталовложений, а сам процесс является энергозатратным из-за высоких температур и давления. Размеры обрабатываемых деталей ограничены размерами камеры прессования, а длительность процесса, который может занимать несколько часов, увеличивает время производства. Не все материалы подходят для ГИС из-за их чувствительности к высоким температурам и давлению. Кроме того, процесс требует использования инертного газа, обычно аргона, что увеличивает эксплуатационные расходы. Доступность оборудования для ГИС ограничена, что может затруднять его использование в некоторых регионах [9].

В итоге, горячее изостатическое прессование — это мощный инструмент для улучшения свойств материалов, особенно востребованный в отраслях, где критичны надежность и качество. Однако его применение требует значительных ресурсов и затрат, что делает его экономически оправданным в основном для высокотехнологичных производств.

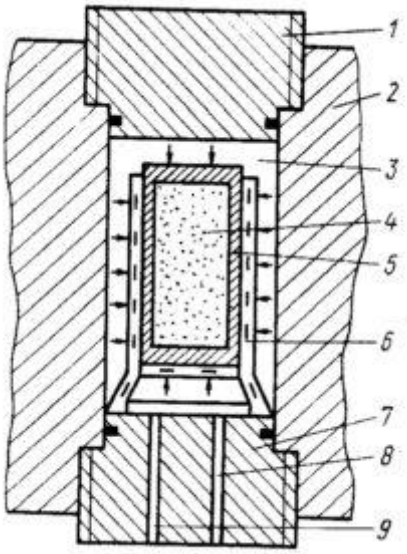

Рисунок 2 - Схема процесса горячего изостатического прессования, где: 1 – верхний затвор; 2 –контейнер высокого давления; 3 – жидкость; 4 – порошок; 5 – эластичный мешок; 6 – перфорированный короб; 7 – нижний затвор; 8 – магистраль высокого давления; 9 – магистраль слива жидкости

1.2.2 Вакуумное конденсационное нанесение покрытий

«Напыление является одним из способов изменения свойств рабочих поверхностей различных деталей машин и инструмента. Основное назначение напыления покрытий – восстановление износа, защита от эрозии, коррозии и других видов разрушения (Рисунок 3).

Напылением можно наносить покрытия с самыми различными свойствами. Можно напылять износостойкие, теплостойкие, теплоизоляционные, коррозионностойкие, электроизоляционные и другие

покрытия. Универсальность и эффективность методов напыления определяется не только возможностью нанесения покрытий из самых различных материалов (сталей, сплавов, цветных металлов, интерметаллидов), но также и возможностью нанесения покрытий на различные материалы.

Все методы напыления принято делить на два вида: газотермическое (ГТН) и вакуумное конденсационное (ВКН).

Общим для всех методов газотермического напыления является то, что исходный напыляемый материал нагревается до температуры плавления или пластифицируется и ускоренно транспортируется в высокотемпературном потоке газа на напыляемую поверхность.

Напыляемый материал поступает на поверхность основы в виде потока диспергированных нагретых частиц, деформируемых при ударе о поверхность, которые ударяются о нее, закрепляются, образуя покрытие. Обычно толщина покрытия составляет 100–500 мкм, а производительность для разных процессов достигает 1–20 кг/ч [5].

Все методы вакуумного конденсационного напыления объединяет то, что исходный материал подвергается распылению до ионизированного парообразного состояния за счет нагрева или механической бомбардировки ускоренным ионным потоком и последующей конденсации образовавшегося пара на поверхности покрываемых изделий, находящихся в той же рабочей камере, что и распределяемый материал» [34].

Одним из главных достоинств этого метода является высокая чистота покрытий, так как процесс происходит в вакууме, исключающем загрязнение примесями из окружающей среды. Это позволяет наносить тонкие и равномерные слои толщиной от нанометров до микрометров с высокой точностью и однородностью. Метод подходит для широкого спектра материалов, включая металлы, сплавы, керамику и полимеры, что делает его универсальным инструментом для создания покрытий с заданными свойствами, такими как оптические, электрические или механические

характеристики. Кроме того, процесс напыления может проводиться при относительно низких температурах, что особенно важно для термочувствительных материалов. Вакуумное напыление также считается экологически чистым методом, так как в нем не используются токсичные химические вещества. Благодаря этим преимуществам, технология активно применяется в микроэлектронике, оптике, производстве солнечных панелей, защитных и декоративных покрытий [33].

Однако у методов вакуумного конденсационного напыления есть и свои недостатки. Основным из них является высокая стоимость оборудования, которое требует значительных капиталовложений и сложного обслуживания. Процесс может быть медленным, особенно при нанесении толстых или многослойных покрытий, что ограничивает производительность. Размеры обрабатываемых деталей также ограничены размерами вакуумной камеры, а нанесение равномерного покрытия на детали сложной геометрии может быть затруднено из-за теневых эффектов. Создание и поддержание вакуума увеличивает энергозатраты и стоимость процесса. Кроме того, для некоторых материалов может потребоваться дополнительная подготовка поверхности для улучшения адгезии покрытия, а сама поверхность деталей должна быть тщательно очищена перед напылением, что увеличивает время и стоимость подготовки [25].

В итоге, методы вакуумного конденсационного напыления обеспечивают высококачественные, тонкие и чистые покрытия, что делает их незаменимыми в микроэлектронике, оптике и других высокотехнологичных отраслях. Однако высокая стоимость оборудования, ограниченная производительность и сложность обработки сложных форм могут ограничивать их применение в некоторых случаях.

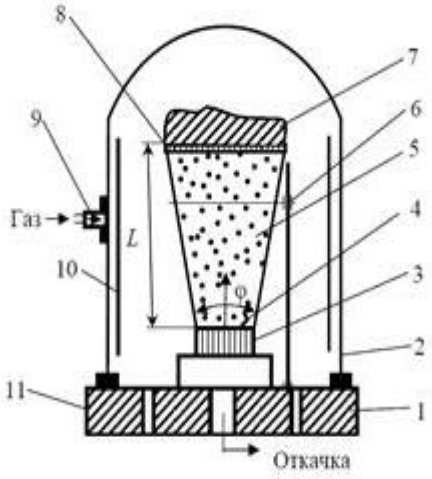

Рисунок 3 - Обобщенная схема процесса вакуумного конденсационного нанесения покрытий, где: 1 – базовая плита; 2 – камера; 3 – распыляемый материал; 4 – подвод энергии для распыления материала; 5 – поток конденсирующихся частиц; 6 – заслонка; 7 – обрабатываемое изделие; 8 – покрытие; 9 – натекатель рабочего газа; 10 – экран; 11 – коммуникационные отверстия

1.2.3 Газопламенное напыление

«Газопламенное напыление — это технология, при которой материал в форме проволоки, прутка или порошка расплавляется под действием тепла, создаваемого горением смеси кислорода и горючего газа. В зависимости от формы напыляемого материала, процесс может быть реализован тремя способами: напыление проволокой, прутком или порошком (Рисунок 4).

При использовании проволоки или прутка материал подается через центральное отверстие горелки, где плавится под воздействием пламени. Расплавленные частицы затем переносятся струей сжатого воздуха на поверхность изделия» [7]. «В случае порошкового напыления материал поступает в горелку из бункера, разгоняется потоком газа (смесь кислорода и горючего газа) и нагревается в пламени» [8]. Нагретые частицы порошка

осаждаются на обрабатываемую поверхность. Температура пламени в процессе достигает примерно 3000 К [32, 38].

“Преимущества газопламенного напыления включают простоту технологии, низкую стоимость оборудования и эксплуатации, возможность нанесения покрытий из неметаллических материалов, а также создание многокомпонентных покрытий путем смешивания порошков разного состава” [7]. Однако метод имеет и свои ограничения. К ним относятся низкий КПД использования энергии для нагрева материала (2-12%), невозможность работы с тугоплавкими материалами, температура плавления которых превышает 3000 К, высокая пористость покрытий (5-25%), что делает их непригодными для использования в коррозионных средах без дополнительной обработки, а также относительно слабая адгезия покрытия к основе (5-45 МПа при испытаниях на отрыв) [16, 39].

«Таким образом, газопламенное напыление — это доступный и универсальный метод, который подходит для многих задач, но его применение ограничено в случаях, где требуются высокая плотность покрытий, работа с тугоплавкими материалами или повышенная прочность сцепления покрытия с основой» [14].

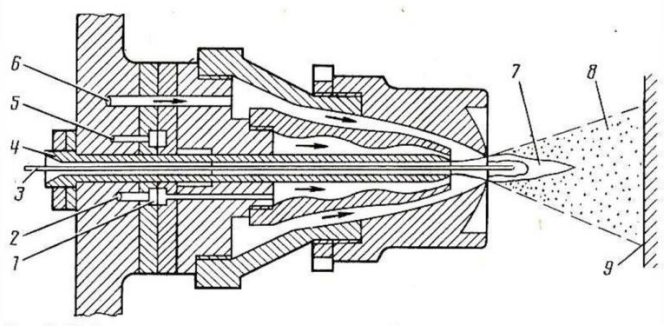

Рисунок 4 - Обобщенная схема процесса газопламенного напыления, где: 1- смесительная камера; 2 – канал подачи кислорода; 3 – проволока; 4 – направляющая втулка; 5 – канал подачи ацетилена; 6 – канал подачи сжатого воздуха; 7 – ацетилено-кислородное пламя; 8 – газометаллическая струя; 9 – напыляемая поверхность

1.2.4 Плазменное напыление

«Плазменное напыление — это процесс, при котором между катодом и медным водоохлаждаемым соплом, выполняющим роль анода, возникает электрическая дуга. Эта дуга нагревает рабочий газ (обычно аргон или азот, иногда с добавлением водорода), поступающий в сопло горелки. Газ выходит из сопла в виде высокотемпературной плазменной струи. Напыляемый материал в виде порошка подается в сопло потоком транспортирующего газа, нагревается плазмой и с высокой скоростью переносится на поверхность основного материала, формируя покрытие (Рисунок 5).

Температура плазменного факела достигает 8000–25000 К, что позволяет наносить покрытия из любых тугоплавких материалов. Покрытия, полученные этим методом, отличаются высокой плотностью [19, 41].

К достоинствам плазменного напыления относится возможность регулирования температуры и скорости плазменной струи за счет выбора формы и диаметра сопла, а также настройки режимов напыления. Однако метод имеет и недостатки, такие как низкая производительность процесса, высокая стоимость оборудования и значительные эксплуатационные расходы. Кроме того, покрытия могут иметь пористость в пределах 5–25 %, что ограничивает их применение в коррозионных средах без дополнительной обработки» [7, 3].

Таким образом, плазменное напыление — это высокотехнологичный метод, позволяющий работать с тугоплавкими материалами и создавать плотные покрытия, но его использование требует значительных ресурсов и затрат [40].

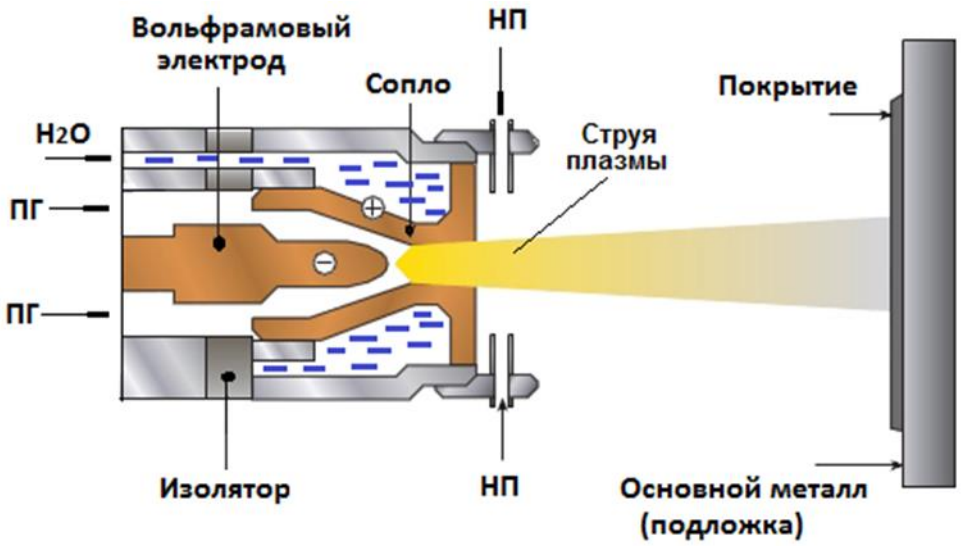

Рисунок 5 - схема процесса плазменного напыления

1.2.5 Лазерная наплавка

Лазерная наплавка — это технология нанесения покрытий или восстановления деталей с использованием лазерного излучения. В процессе лазерной наплавки луч лазера фокусируется на поверхность обрабатываемой детали, создавая локальную зону плавления. Одновременно в эту зону подается наплавочный материал в виде порошка, проволоки или прутка. Под воздействием лазерного луча материал плавится и соединяется с основным металлом, формируя плотный и прочный слой. Лазерная наплавка позволяет точно контролировать глубину и площадь обработки, что делает её особенно подходящей для работы с мелкими или сложными деталями (Рисунок 6) [27, 35, 36].

К преимуществам лазерной наплавки относится высокая точность, которая достигается за счет фокусировки лазерного луча, что позволяет минимизировать тепловое воздействие на окружающие области и снизить риск деформации детали. Локальный нагрев и малая зона термического влияния уменьшают риск коробления или изменения геометрии детали, а наплавленный материал прочно соединяется с основным металлом,

обеспечивая высокую адгезию. Лазерная наплавка также позволяет работать с тугоплавкими материалами, такими как керамика, карбиды или высоколегированные стали, которые сложно обрабатывать традиционными методами. Покрытия, полученные этим методом, отличаются высокой плотностью и низкой пористостью. Процесс легко интегрируется в автоматизированные системы, что повышает производительность и повторяемость результатов, а также является экологичным, так как не требует использования токсичных химических веществ [6, 4, 57].

Однако у лазерной наплавки есть и недостатки. Основным из них является высокая стоимость оборудования, так как лазерные установки и системы подачи материала требуют значительных капиталовложений. Процесс может быть медленным, особенно при обработке крупных деталей или нанесении толстых слоев, что ограничивает производительность. Размеры обрабатываемых деталей также ограничены возможностями лазерной установки и системой подачи материала. Нанесение равномерного покрытия на детали сложной геометрии может потребовать сложной настройки оборудования, а поверхность детали должна быть тщательно очищена и подготовлена для обеспечения качественной адгезии. Лазерные установки потребляют значительное количество энергии, что увеличивает эксплуатационные расходы, а оборудование для лазерной наплавки доступно не во всех регионах, что может затруднять его использование [31, 59].

Таким образом, лазерная наплавка — это высокоточная и эффективная технология, которая позволяет создавать плотные и прочные покрытия с минимальным воздействием на основную деталь. Она особенно востребована в аэрокосмической, медицинской и машиностроительной отраслях. Однако высокая стоимость оборудования, ограниченная производительность и сложность обработки сложных форм могут ограничивать её применение в некоторых случаях.

Рисунок 6 - схема лазерной наплавки

1.2.6 Двухдуговая наплавка

«Двухдуговая наплавка — это технология, при которой используются две горелки, закрепленные на подвижном портале. Через сопло одной горелки подается стальная проволока, а через сопло другой — алюминиевая электродная проволока. В процессе горения дуги проволоки перемешиваются в сварочной ванне, формируя наплавленный слой. Для защиты сварочной ванны используется аргон, который создает защитную газовую среду, предотвращающую окисление и загрязнение зоны сварки [28].

К достоинствам двухдуговой наплавки относится высокая производительность процесса, низкая стоимость оборудования и наплавочных материалов, а также высокая прочность сцепления наплавленного покрытия с основным металлом. В отличие от однодуговой наплавки, для этого метода могут использоваться два маломощных источника питания, что делает процесс более гибким и экономичным [15, 52].

Однако у двухдуговой наплавки есть и недостатки, такие как разбрызгивание электродных проволок, что может привести к потере материала, и сложная система управления процессом, требующая точной настройки и контроля параметров» [7, 10].

Таким образом, двухдуговая наплавка — это эффективный метод, который обеспечивает высокую производительность и прочное соединение наплавленного слоя с основным материалом. Однако его применение требует тщательного контроля и управления для минимизации потерь материала и обеспечения качественного результата [42, 43, 51].

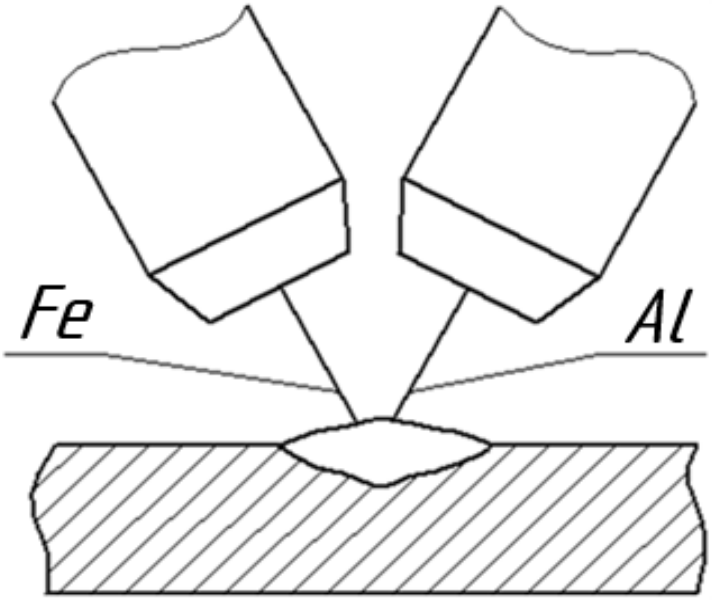

Рисунок 7 - Двухдуговой способ наплавки с использованием электродных проволок

1.3 Влияние параметров на формирование наплавленного металла

При формировании алюминидов железа ключевое влияние на свойства и структуру покрытия оказывают технологические параметры: сила тока, напряжение, скорость сварки, скорость подачи проволоки и угол наклона горелки

1.3.1 Влияние силы тока на формирование наплавленного металла

На качество сварных соединений значительное влияние оказывает процесс переноса жидкого металла с электрода через дуговой промежуток в сварочную ванну [44, 47].

С помощью скоростной киносъемки удалось установить, что жидкий металл переносится через межэлектродный промежуток в виде капель. При этом сила сварочного тока существенно влияет на характер этого процесса.

Существует три основные формы (Рисунок 8) переноса жидкого металла через дуговой промежуток:

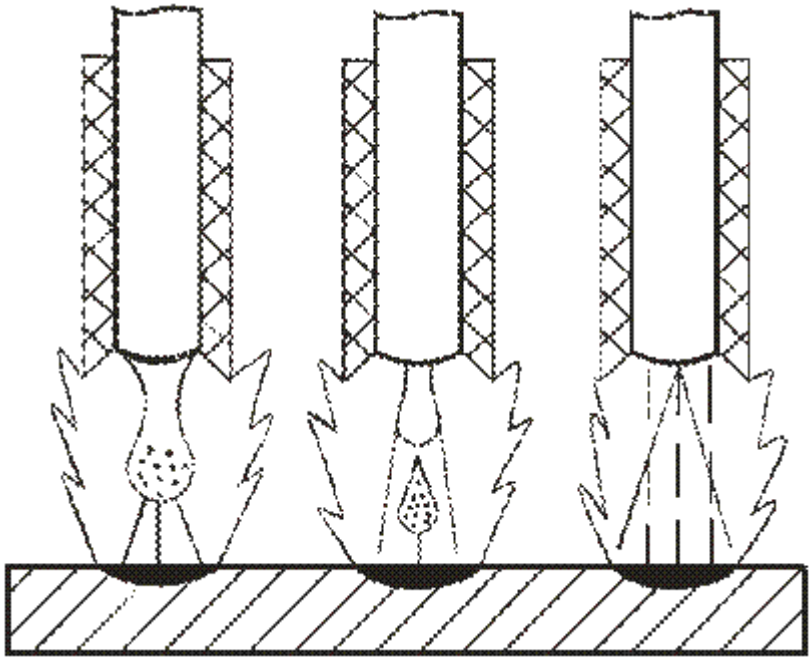

Рисунок 8 – схема переноса металла через сварочную дугу

Крупнокапельный перенос - происходит при плотности сварочного тока до 50 А/мм2 [26].

Мелкокапельный перенос - наблюдается при плотности сварочного тока от 50 до 100 А/мм2 [22].

Струйный перенос - характеризуется образованием очень мелких капель при плотности тока свыше 100 А/мм2 [21].

Таким образом, с увеличением силы сварочного тока размеры капель уменьшаются. Кроме силы тока, на размеры капель могут влиять марка сварочной проволоки и химический состав газов в межэлектродном промежутке, так как они изменяют поверхностную энергию жидкого металла, которая определяет размеры капель [46, 58].

Отрыв и перенос капель жидкого металла через межэлектродный промежуток происходят под действием следующих сил: силы тяжести, поверхностного натяжения, электромагнитных сил Лоренца, а также давления газов и паров металла [45].

1.3.2 Влияние напряжения на формирование наплавленного металла

«Среди всех параметров режимов автоматической дуговой сварки напряжение дуги наиболее сильно влияет на ширину сварочного шва. При увеличении напряжения возрастает» [3] «длина и подвижность дуги, что приводит к повышению доли теплоты, расходуемой на плавление основного металла и флюса. В результате (Рисунок 9) ширина шва значительно увеличивается, а глубина проплавления уменьшается, что особенно важно при сварке тонколистового металла. Также наблюдается небольшое снижение высоты выпуклости шва.

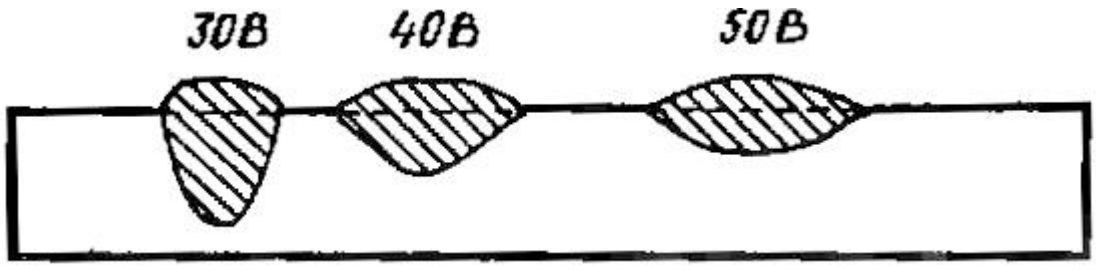

Рисунок 9 – влияние напряжения дуги на форма шва

Зависимость ширины шва от напряжения дуги также связана с родом тока. При одинаковых значениях напряжения ширина шва при сварке на постоянном токе, особенно при обратной полярности, существенно больше, чем при сварке на переменном токе» [11, 13].

1.3.3 Влияние скорости сварки на формирование наплавленного металла

«Влияние скорости сварки (рисунок 10) на глубину проплавления и ширину шва имеет сложный характер. При начальном увеличении скорости сварки столб дуги сильнее вытесняет жидкий металл, толщина слоя жидкого металла под дугой уменьшается, и глубина проплавления возрастает. Однако при дальнейшем увеличении скорости сварки (более 40–50 м/ч) погонная энергия снижается, и глубина проплавления начинает уменьшаться. При этом во всех случаях увеличение скорости сварки приводит к уменьшению ширины шва.

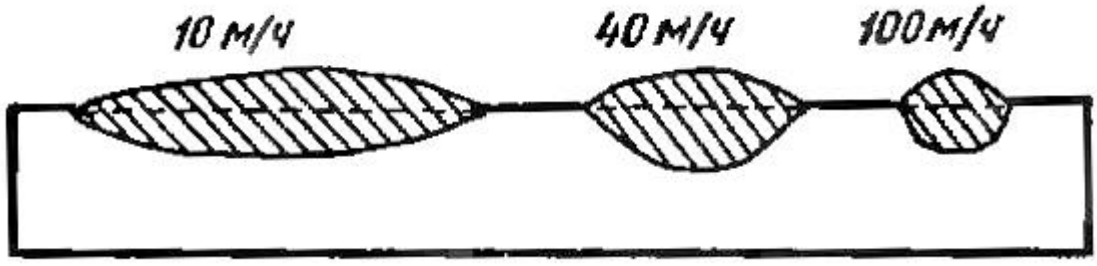

Рисунок 10 – влияние скорости сварки на форму шва

При скорости сварки свыше 70–80 м/ч основной металл не успевает достаточно прогреваться, что может вызвать несплавления кромок или подрезы по обеим сторонам шва. Для сварки на высоких скоростях применяют специальные методы, такие как двухдуговая сварка или сварка трехфазной дугой» [20, 23].

1.3.4 Влияние скорости подачи электродной проволоки на формирование наплавленного металла

«Этот параметр режима сварки тесно связан с силой сварочного тока и напряжением дуги. Для обеспечения устойчивого процесса сварки скорость подачи электродной проволоки должна соответствовать скорости ее плавления. Если скорость подачи проволоки недостаточная, это может привести к периодическим обрывам дуги, а при избыточной скорости возникают частые короткие замыкания электрода на сварочную ванну. Подобные нарушения вызывают появление непроваров и ухудшают формирование шва» [20, 13].

1.3.5 Влияние наклона горелки на формирование наплавленного металла

«Обычно сварку выполняют вертикально расположенным электродом, но в некоторых случаях электрод может быть наклонен углом вперед или углом назад (рисунок 11).

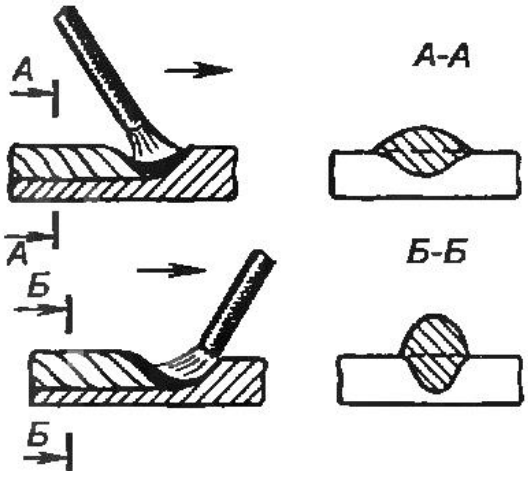

Рисунок 11 – влияние наклона горелки на формирование шва

При сварке углом вперед жидкий металл подтекает под дугу, увеличивая толщину его слоя и уменьшая глубину проплавления» [11]. «При этом высота выпуклости шва снижается, но ширина шва значительно возрастает, что делает этот метод подходящим для сварки тонкого металла. Кроме того, при таком способе лучше проплавляются свариваемые кромки, что позволяет увеличить скорость сварки.

При сварке углом назад жидкий металл вытесняется из-под дуги под давлением газов, что уменьшает толщину его слоя и увеличивает глубину проплавления. В этом случае высота выпуклости шва возрастает, но его ширина уменьшается. Из-за глубокого проплавления и недостаточного прогрева кромок возможны несплавления основного металла с наплавленным, а также образование пористости в шве. Поэтому данный метод применяют ограниченно, преимущественно для сварки толстого металла на высоких скоростях, например при двухдуговой сварке или выполнении кольцевых швов малого диаметра» [11, 30].

Таким образом задачами работы являются:

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

2. Исследование влияния режимов двухдуговой наплавки на процессы формирования наплавленных алюминидов железа.

3. Исследование влияния режимов двухдуговой наплавки на химический состав и структуру наплавленных сплавов.

2 Методика исследования процессов двухдуговой наплавки интерметаллидных сплавов системы железо-алюминий

2.1 Исследование процессов формирования

«Исследования наплавки проводились на сконструированной автоматизированной установки для двух дуговой наплавки, состоящей из: рамы, двух направляющих рельс, подвижного портала с закрепляющим и регулируемым механизмом для двух горелок (рисунок 12), а также двух источников питания. При помощи данной установки, мы можем производить двухдуговую наплавку в автоматическом режиме. Портал приводиться в движение при помощи блока управления (рисунок 13), также им можно выбирать направление движения и плавно регулировать скорость движения. Дуга зажигается при помощи пульта управления (рисунок 14)» [7].

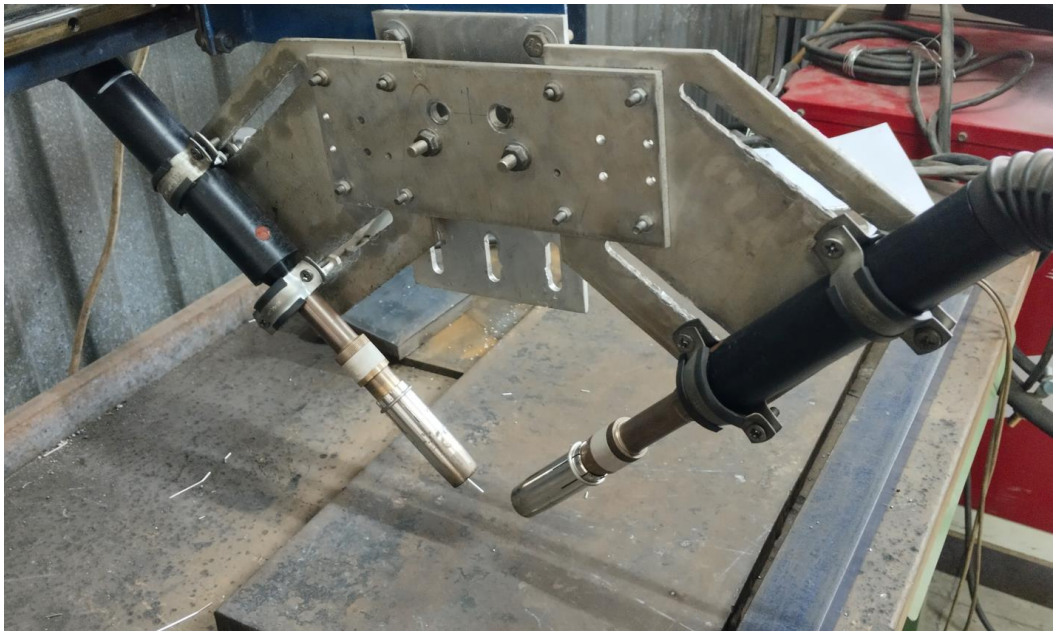

Рисунок 12 – Автоматическая двухдуговая установка для наплавки

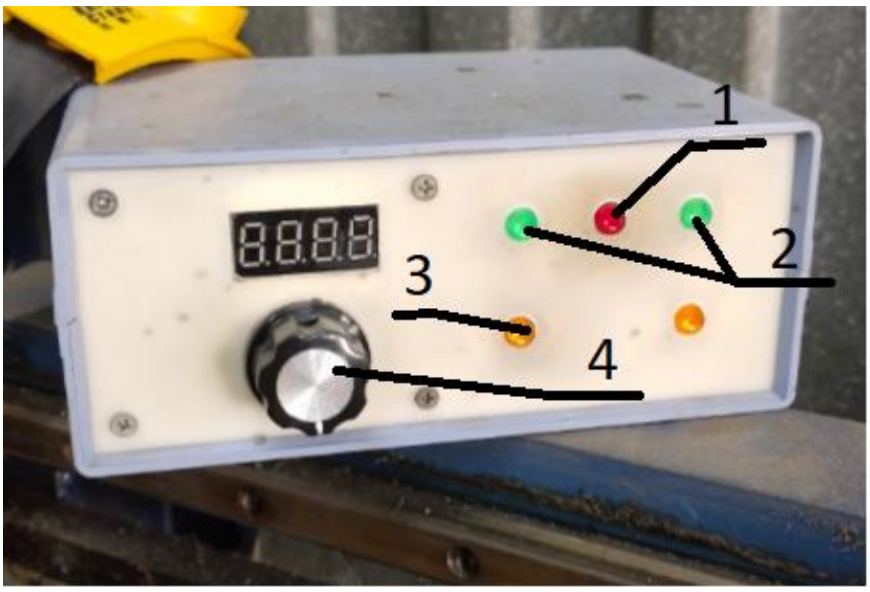

Рисунок 13 – Блок управления порталом

1 - Кнопка пуска портала; 2 - кнопки направления движения портала; 3 - Кнопка ускорения портала; 4 - Тумблер плавной регулировки скорости портала

Рисунок 14 – Пульт управления зажигания дуги.

«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» [17], 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.

«Для наплавки использовались образцы из стали марки Ст3 размером 150х130 мм и толщиной 10 мм. В качестве электродных материалов применялась сварочная проволоки Св-А7 диаметром 41,2 мм; ER70S-6 (аналог Св08Г2С) диаметром 1,2 мм (в отличие от отечественного вариант, ER70S-6 имеет незначительно лучше химический состав и тонкое однородное медное покрытие, которое максимально увеличивает электропроводность и защищает провод от коррозии).

Источниками питания для наплавки использовались пара универсальных сварочных источников Eurotronic MIG TIG 550 I PULS K (рисунок 15)» [17] и Megatronic BDH 550 (рисунок 16).

Рисунок 15 – Сварочный полуавтоматический источник питания Eurotronic MIG TIG 550 I PULS K

Рисунок 16 - 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.

Геометрические параметры проводили на образцах прошедших травление 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 17).

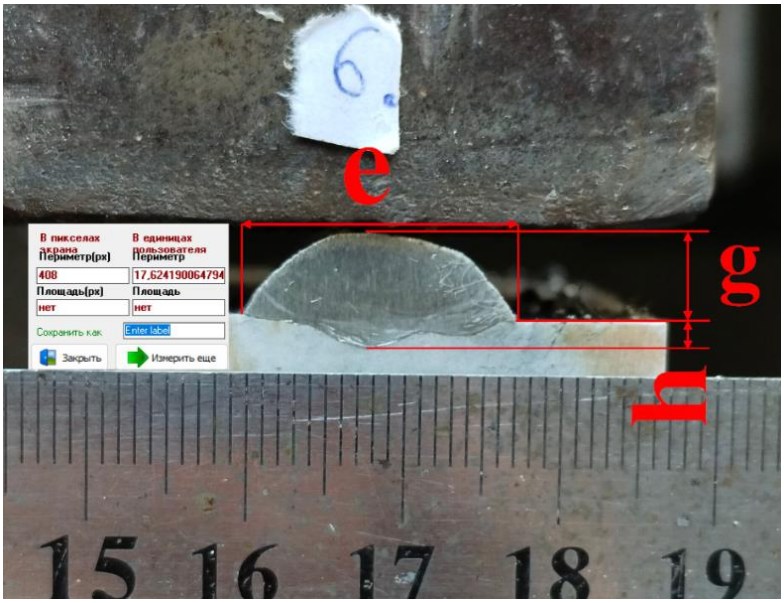

Рисунок 17 – Схема измерения геометрических параметров наплавленных валиков при помощи программы *Universal Desktop Ruler*

2.2 Методика исследования геометрических параметров наплавленных валиков

После проведения наплавки на стальные пластины марки ст3 размерами 150х130мм и толщиной 10мм образовывалось 6 интерметаллидных валиков. Для дальнейшего анализа геометрических параметров валиков, пластины необходимо было разрезать на 6 образцов, а после данные образцы разрезались пополам в поперечном сечении.

После данных операций половинки образцов травились в растворе (20% от HNO3), далее промывались в воде и сушились для более лучшего выявления контуров наплавленного валика [55, 56].

Рисунок 18 – Пластина с наплавленными на ней валиками

Рисунок 19 – Вырезанный образец №20

Измерения геометрических параметров наплавленных валиков проводились на наплавленных образцах, порезанных в поперечном сечении.

Измерения геометрических показателей наплавленного валика проводились при помощи программы Universal Desktop Ruler с заданием масштаба по фотографии и последующем измерении геометрии валиков(рисунок 17).

3 Результаты исследования процессов двухдуговой наплавки алюминидов железа

3.1 Подбор и обоснование режимов наплавки

Во время проведения экспериментов по наплавке алюминидов железа на пластины был выбран широкий диапазон режимов (таблица 1), для того чтобы выявить режимы при которых образуются валики с стабильными геометрическими параметрами, а так же без хрупких интерметаллидных фаз.

Таблица 1 – Режимы наплавки интерметаллидного покрытия типа железо-алюминий

Номер опыта	VподAl, м/мин	VподFe, м/мин	Vн.м/мин	UдAl, В	UдFe, В
1	5	5	22,5	17	27,5
2	5	5	22,5	14	23,5
3	5	5	22,5	14	23,5
4	4	5	22,5	14	23,5
5	6	5	22,5	17	23,5
6	5	5	20	14	27,5
7	5	5	20	17	23,5

Каждая числовая единица опыта также указывает на нумерацию наплавленных образцов. После проведения ряда наплавочных лабораторных экспериментов, мы получили следующие геометрические параметры (таблица 2).

Таблица 2 - 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 20– Внешний вид наплавленного валика №7

Рисунок 21– Внешний вид наплавленного валика №2

Рисунок 22 – Внешний вид наплавленного валика №6

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

3.2 Влияние режимов наплавки на сварочно-технологические свойства

Во время проведения экспериментов и подборке режимов были замечены изменения в сварочно-технологических свойствах, такие как степень разбрызгивания, диаметр капель при разбрызгивании, а так же количество трещин по прошествию 2-х дней после наплавки (Таблица 3).

Таблица 3 – Влияние режимов наплавки на сварочно-технологические свойства

№	Разбрызгивание	Диаметр капель, мм	Кол-во трещин
1	Сильное	2.5	5
2	Сильное	2	8
3	Сильное	3	8
4	Сильное	2,4	4
5	Сильное	2,6	7
6	Среднее	2,3	7
7	Сильное	2,5	4

Рисунок 23 – Внешний вид разбрызгивания образца №5

По проведению ряда экспериментов, было установлено, что при разных режимах сварочно-технологические свойства наплавки не имеют больших отличий.

3.3 Влияние режимов наплавки на геометрические параметры наплавленных сплавов

Во время подбора режимов были замечены изменения в геометрических параметрах наплавленных валиков. И составлены уравнения регрессии с учетом разного положения углов горелки.

При изменении переменных в режимах, были замечены разные изменения в геометрии наплавленных валиков.

Для анализа изменения геометрических параметров наплавленных валиков использовались линейные и полиномиальные модели.

1) Уравнение регрессии ширины наплавленных валиков:
   e = -0.542 + 0.557*Ud - 24.437*Vn + 1.258*Vpp - 0.038*α (R-квадрат = 0.666)
2) Уравнение регрессии глубины проправления наплавленных валиков:
   g = 7.309 - 0.136*Ud - 16.460*Vn + 0.281*Vpp + 0.016*α (R-квадрат = 0.590)
3) Уравнение регрессии высоты наплавленных валиков:
   h = -1.703 + 0.044*Ud + 0.476*Vn + 0.146*Vpp + 0.003*α (R-квадрат = 0.496)

3.3.1 Анализ полученных данных

Для начала необходимо вычислить средние значения Vn, Vpp и α из набора данных. Вместе с двухдуговой наплавкой так же проводились эксперименты по однодуговой, и вместе их количество составило 127 наблюдений, полученных при различных режимах сварки.

Vn в данных наблюдениях является скоростью наплавки, где все значения это: [0,1, 0,15, 0,2 м/мин].

Среднее значение Vn составило: (0,1 + 0,15 + 0,2) / 3 = 0,15

Vpp в данных наблюдениях является скоростью подачи проволки, где все значения это [4, 5, 6 м/мин].

Среднее значение Vpp составило : (4+5+6)/3 = 5

Так же в данных наблюдениях α является углом наклона горелки, где все значения это: [90, 75, 60, 45, 30].

Среднее значение α составило: (90+75+60+45+30)/5 = 60

После вычисления средних значений набора данных, необходимо провести анализ производной для ширины:

- Уравнение производной: d(Ширина)/d(Ud) = 1,151 - 0,004*Ud - 0,658*Vn - 0,031*Vpp - 0,004*Альфа

- Подставляем средние значения: d(Ширина)/d(Ud) = 1,151 - 0,004*Ud - 0,658*0,15 - 0,031*5 - 0,004*60
- Упрощаем: d(Ширина)/d(Ud) = 1,151 - 0,004*Ud - 0,0987 - 0,155 - 0,24 = 0,6573 - 0,004*Ud

После проведения анализа производной для ширины, необходимо провести анализ влияния напряжения дуги (Ud) для ширины:

- Производная: d(Ширина)/d(Ud) = 0,6573 - 0,004*Ud

Знак производной зависит от значения напряжения дуги, если Ud < 0,6573 / 0,004 = 164,325, то производная положительная, и увеличение напряжения дуги приводит к увеличению ширины. Если напряжение дуги меньше 164,325, то производная будет являться отрицательной, и увеличение напряжения дуги приводит к уменьшению ширины.

Напряжение дуги в нашем диапазоне, а конкретно (17.5 - 25), производная всегда положительная в связи с тем, что (17.5 - 25) будет меньше чем 164,325. Следовательно сила влияния напряжения дуги на ширину уменьшается с ростом напряжения дуги.

Далее нужно провести анализ производной для высоты:

- Уравнение производной: d(Высота)/d(Ud) = -2,299 + 0,072*Ud + 0,329*Vn + 0,102*Vpp + 0,001*Альфа
- Подставляем средние значения: d(Высота)/d(Ud) = -2,299 + 0,072*Ud + 0,329*0,15 + 0,102*5 + 0,001*60
- Упрощаем: d(Высота)/d(Ud) = -2,299 + 0,072*Ud + 0,04935 + 0,51 + 0,06 = -1,67965 + 0,072*Ud

После проведения анализа производной для высоты , проводим анализ влияния напряжения дуги для высоты.

- Производная: d(Высота)/d(Ud) = -1,67965 + 0,072*Ud

Знак производной зависит от значения напряжения дуги. Если напряжение дуги будет больше чем 1,67965 / 0,072 = 23,328, то производная отрицательная, и увеличение напряжения дуги приводит к уменьшению

высоты. Если напряжение дуги больше чем 23,328, то производная положительная и увеличение напряжения дуги приводит к увеличению высоты. В данном диапазоне напряжении дуги, а конкретно (17.5 - 25) влияние напряжения дуги на высоту меняется, где 17.5 меньше 23,328, а 25 больше чем 23,328, тогда при напряжении дуги 17,5 увеличение напряжения приводит к уменьшению высоты, а в свою очередь увеличение напряжения при Ud больше 25, приводит к увеличению высоты.

Анализ влияния напряжения дуги для глубины показал, что если напряжение дуги меньше чем 7,8875, то производная отрицательная и увеличение напряжения дуги приводит к уменьшению глубины.

В нашем диапазоне напряжения от 17,5 до 25 производная будет всегда положительная. Так как от 17,5 до 25 всегда будет больше чем 7,8875, поэтому в указанном диапазоне увеличение напряжения дуги всегда приводит к увеличению глубины.

Общие выводы (на основе полиномиальных моделей и средних значений) показывают, что:

- Ширина: в рассматриваемом диапазоне (17,5-25) с увеличением напряжения дуги ширина увеличивается, но сила влияния напряжения дуги уменьшается
- Высота: влияние напряжения дуги на высоту меняется в диапазоне 17,5 < 23,328 < 25. При напряжением дуги меньшим 23,328, увеличение напряжения дуги ведет к уменьшению высоты, а при Ud>23,328 увеличение напряжения дуги ведет к увеличению высоты.
- Глубина: в рассматриваемом диапазоне (17,5-25) с увеличением напряжением дуги глубина увеличивается

Дальше нам нужно провести анализ влияния напряжения дуги по линейным моделям.

В линейных моделях влияние напряжения дуги просто и напрямую определяется коэффициентом при Ud в уравнении. Влияние Ud постоянно и не зависит от других параметров, которые мы зафиксировали на средних значениях.

Вычисляем средние значения. Мы будем использовать те же средние значения Vn, Vpp и α, что и в предыдущем анализе:

- Vn (скорость наплавки): 0.15
- Vpp (скорость подачи проволоки): 5
- Alpha (угол наклона горелки): 60

Анализ ширины:

- Уравнение: Ширина = -0.542 + 0.557*Ud - 24.437*Vn + 1.258*Vpp - 0.038*Alpha
- Подставляем средние значения: Ширина = -0.542 + 0.557*Ud - 24.437*0.15 + 1.258*5 - 0.038*60
- Упрощаем: Ширина = -0.542 + 0.557*Ud - 3.6655 + 6.29 - 2.28 = 0.557*Ud - 0.1975
- Коэффициент при Ud: 0.557

С увеличением напряжения дуги на 1 вольт увеличивается и ширина шва примерно на 0,557 мм, независимо от значения Ud.

Влияние напряжения дуги: положительное, увеличение напряжения дуги ведет к увеличению ширины.

Анализ высоты:

- Уравнение: Высота = 7.309 - 0.136*Ud - 16.460*Vn + 0.281*Vpp + 0.016*Alpha
- Подставляем средние значения: Высота = 7.309 - 0.136*Ud - 16.460*0.15 + 0.281*5 + 0.016*60
- Упрощаем: Высота = 7.309 - 0.136*Ud - 2.469 + 1.405 + 0.96 = -0.136*Ud + 7.205
- Коэффициент при Ud: -0.136

С увеличением напряжения дуги на 1 вольт уменьшается высота шва примерно на 0,136 мм, независимо от значения напряжения дуги [50].

Влияние Ud: отрицательное, увеличение напряжения дуги ведет к уменьшению высоты.

Анализ глубины:

- Уравнение: Глубина = -1.703 + 0.044*Ud + 0.476*Vn + 0.146*Vpp + 0.003*Alpha
- Подставляем средние значения: Глубина = -1.703 + 0.044*Ud + 0.476*0.15 + 0.146*5 + 0.003*60
- Упрощаем: Глубина = -1.703 + 0.044*Ud + 0.0714 + 0.73 + 0.18 = 0.044*Ud - 0.7216
- Коэффициент при Ud: 0.044

Увеличение напряжения дуги на 1 вольт приводит к увеличению глубины проплавления примерно на 0,044 мм, независимо от значения Ud.

Влияние Ud: Положительное, увеличение напряжения дуги ведет к увеличению глубины.

Общие выводы (на основе линейных моделей и средних значений):

- Ширина: С увеличением Ud, ширина увеличивается.
- Высота: С увеличением Ud, высота уменьшается.
- Глубина: С увеличением Ud, глубина увеличивается.

Анализ влияния скорости наплавки (Линейные модели):

В линейных моделях влияние скорости наплавки определяется просто и напрямую коэффициентом при скорости наплавки в уравнении. Влияние скорости наплавки постоянно и не зависит от других параметров [48,49].

Вычисление средних значений:

Мы будем использовать следующие средние значения:

- Ud (напряжение дуги): среднее значение Ud посчитаем: (17,5+20+22,5+25)/4 = 21,25
- Vpp (скорость подачи проволоки): 5

- Alpha (угол наклона горелки): 60

Анализ ширины:

- Уравнение: Ширина = -0.542 + 0.557*Ud - 24.437*Vn + 1.258*Vpp - 0.038*Alpha
- Подставляем средние значения: Ширина = -0.542 + 0.557*21.25 - 24.437*Vn + 1.258*5 - 0.038*60
- Упрощаем: Ширина = -0.542 + 11.83125 - 24.437*Vn + 6.29 - 2.28 = 15.29925 - 24.437*Vn
- Коэффициент при Vn: -24.437

Увеличение скорости наплавки (Vn) на 1 м/мин приводит к уменьшению ширины шва примерно на 24,437 мм, независимо от значения Vn. Это очень большое влияние!

Влияние скорости наплавки: отрицательное, увеличение скорости наплавки приводит к уменьшению ширины.

Анализ высоты:

- Уравнение: Высота = 7.309 - 0.136*Ud - 16.460*Vn + 0.281*Vpp + 0.016*Alpha
- Подставляем средние значения: Высота = 7.309 - 0.136*21.25 - 16.460*Vn + 0.281*5 + 0.016*60
- Упрощаем: Высота = 7.309 - 2.89 - 16.460*Vn + 1.405 + 0.96 = 6.784 - 16.460*Vn
- Коэффициент при Vn: -16.460

Увеличение скорости наплавки на 1 м/мин приводит к уменьшению высоты шва примерно на 16,460 мм, независимо от значения скорости наплавки.

Влияние скорости наплавки: отрицательное, тоесть увеличение скорости наплавки приводит к уменьшению высоты.

Анализ глубины:

- Уравнение: Глубина = -1.703 + 0.044*Ud + 0.476*Vn + 0.146*Vpp + 0.003*Alpha
- Подставляем средние значения: Глубина = -1.703 + 0.044*21.25 + 0.476*Vn + 0.146*5 + 0.003*60
- Упрощаем: Глубина = -1.703 + 0.935 + 0.476*Vn + 0.73 + 0.18 = 0.142 + 0.476*Vn
- Коэффициент при Vn: 0.476

Увеличение скорости наплавки на 1 м/мин приводит к увеличению глубины проплавления примерно на 0,476 мм, независимо от значения скорости наплавки.

Влияние скорости наплавки: положительное, тоесть увеличение скорости наплавки приводит к увеличению глубины.

Общие выводы (на основе линейных моделей):

- Ширина: с увеличением Vn ширина уменьшается. Влияние очень сильное.
- Высота: с увеличением Vn высота уменьшается. Влияние сильное.
- Глубина: С увеличением Vn, глубина увеличивается.

Мы будем использовать следующие средние значения:

- Ud (напряжение дуги): 21.25
- Vpp (скорость подачи проволоки): 5
- α (угол наклона горелки): 60

Анализ ширины:

- Производная ширины по Vn:
  d(Ширина)/d(Vn) = -53.057 - 0.658*Ud - 0.499*Vpp - 0.072*Alpha + 2*165.221*Vn = -53.057 - 0.658*Ud - 0.499*Vpp - 0.072*Alpha + 330.442*Vn
- Подставляем средние значения:

d(Ширина)/d(Vn) = -53.057 - 0.658*21.25 - 0.499*5 - 0.072*60 + 330.442*Vn = -53.057 - 13.9825 - 2.495 - 4.32 + 330.442*Vn = -73.8545 + 330.442*Vn

- Интерпретация:

  d(Ширина)/d(Vn) = -73.8545 + 330.442*Vn

Знак производной: зависит от Vn. d(Ширина)/d(Vn) = 0, при Vn = 73,8545 / 330,442 = 0,2235. Если скорость наплавки меньше чем 0,2235, то увеличение скорости наплавки приводит к уменьшению ширины шва, но если скорость наплавки больше чем 0,2235, то с увеличением скорости наплавки увеличивается ширина шва. В нашем диапазоне данных (0.1 - 0.2), влияние скорости наплавки меняется.

Анализ высоты: если скорость наплавки меньше 0,0603, то увеличение скорости наплавки приводит к уменьшению высоты шва. Если скорость наплавки больше 0.0603, то увеличение скорости наплавки ведет к увеличению высоты шва, в нашем диапазоне данных (0.1 - 0.2) d(Высоты)/d(Vn) > 0, поэтому увеличение скорости наплавки всегда приведет к увеличению высоты валика.

Анализ глубины: если скорость наплавки меньше 0,11, то увеличение скорости наплавки приводит к уменьшению глубины шва, но если скорость наплавки больше 0,11, то увеличение скорости наплавки приводит к увеличению глубины шва, в нашем диапазоне данных (от 0,1 до 0,2) влияние скорости наплавки не меняется.

Общие выводы (на основе полиномиальных моделей):

- Ширина: Влияние скорости наплавки меняется.
- Высота: в нашем диапазоне данных (0,1–0,2) увеличение скорости наплавки всегда приведет к увеличению высоты валика
- Глубина: Влияние скорости наплавки меняется.

Влияние скорости подачи проволоки (Vpp) (полиномиальная модель)

Мы будем использовать следующие средние значения:

- Ud (напряжение дуги): 21.25
- Vn (скорость наплавки): 0.15
- Alpha (угол наклона горелки): 60

Анализ ширины:

Если скорость подачи проволоки меньше 7,3795, то увеличение скорости подачи проволоки приводит к увеличению ширины шва, но если скорость подачи проволоки больше 7,3795, то увеличение скорости подачи проволоки приводит к уменьшению ширины шва. В нашем диапазоне данных (от 4 до 6) увеличение скорости подачи проволоки приводит к увеличению ширины шва.

Анализ высоты:

Если скорость подачи проволоки меньше 4,777, то увеличение скорости подачи проволоки приводит к уменьшению высоты шва, но если скорость подачи проволоки будет больше 4,777, то увеличение скорости подачи проволоки приводит к увеличению высоты шва. В нашем диапазоне данных (от 4-6) влияние скорости подачи проволоки меняется. При Vpp = 4–4,777 увеличение Vpp приводит к уменьшению высоты шва, а при Vpp = 4,777–6 увеличение Vpp приводит к увеличению высоты шва.

Анализ глубины:

Знак производной всегда положительный. В нашем диапазоне данных (от 4 до 6) увеличение скорости подачи проволоки всегда приводит к увеличению глубины.

Общие выводы (на основе полиномиальных моделей):

- Ширина: в нашем диапазоне данных (4 - 6) увеличение Vpp ведет к увеличению ширины.
- Высота: в нашем диапазоне данных (4 — 6) влияние Vpp меняется. При Vpp = 4 — 4,777 увеличение Vpp приводит к уменьшению высоты шва, а при Vpp = 4,777 — 6 увеличение Vpp приводит к увеличению высоты шва.

- Глубина: в нашем диапазоне данных (4–6) увеличение Vpp ведет к увеличению глубины.

Анализ влияния скорости подачи проволоки (Vpp (Линейные модели)):

В линейных моделях влияние Vpp определяется коэффициентом при Vpp в уравнении. Влияние Vpp постоянно и не зависит от других параметров.

Мы будем использовать следующие средние значения:

- Ud (напряжение дуги): 21.25
- Vn (скорость наплавки): 0.15
- Alpha (угол наклона горелки): 60

Анализ ширины:

Увеличение скорости подачи проволоки (Vpp) на 1 м/мин приводит к увеличению ширины шва примерно на 1,258 мм, влияние скорости подачи проволки положительное, что значит увеличение скорости подачи провлки приводит к увеличению ширины шва.

Анализ высоты:

Увеличение скорости подачи проволоки (Vpp) на 1 м/мин приводит к увеличению высоты шва примерно на 0,281 мм. Влияние скорости подачи проволки положительное, что значит увеличение скорости подачи проволки приводит к увеличению высоты.

Анализ глубины:

Увеличение скорости подачи проволоки (Vpp) на 1 м/мин приводит к увеличению глубины проплавления примерно на 0,146 мм. Влияние скорости подачи проволки положительное, что означает увеличение скорости подачи проволки приводит к увеличению глубины.

Общие выводы (на основе линейных моделей):

- Ширина: С увеличением Vpp, ширина увеличивается.
- Высота: С увеличением Vpp, высота увеличивается.
- Глубина: С увеличением Vpp, глубина увеличивается.

Анализ влияния угла наклона горелки Alpha (Линейные модели):

В линейных моделях влияние угол наклона горелки определяется коэффициентом при Alpha в уравнении. Влияние угла наклона горелки постоянно и не зависит от других параметров.

Мы будем использовать следующие средние значения:

- Ud (напряжение дуги): 21.25
- Vn (скорость наплавки): 0.15
- Vpp (скорость подачи проволоки): 5

Анализ ширины:

Увеличение угла наклона горелки (Alpha) на 1 градус приводит к уменьшению ширины шва примерно на 0,038 мм. Влияние угла наклона горелки отрицательное, что значит увеличение угла наклона горелки ведет к уменьшению ширины.

Анализ высоты:

Увеличение угла наклона горелки (Alpha) на 1 градус приводит к увеличению высоты шва примерно на 0,016 мм. Влияние угла наклона горелки положительное, что означает увеличение угла наклона горелки ведет к увеличению высоты.

Анализ глубины:

Увеличение угла наклона горелки (Alpha) на 1 градус приводит к увеличению глубины проплавления примерно на 0,003 мм. Влияние угла наклона горелки положительное, что значит увеличение угла наклона горелки ведет к увеличению глубины.

Общие выводы (на основе линейных моделей):

- Ширина: С увеличением Alpha, ширина уменьшается.
- Высота: С увеличением Alpha, высота увеличивается.
- Глубина: С увеличением Alpha, глубина увеличивается.

Мы будем использовать следующие средние значения:

- Ud (напряжение дуги): 21.25
- Vn (скорость наплавки): 0.15

- Vpp (скорость подачи проволоки): 5

Анализ ширины:

Влияние угла наклона горелки на ширину положительное. В диапазоне данных (30-90) d(Ширина)/d(Alpha) > 0. Что значит с увеличение наклона горелки ширина увеличивается.

Анализ высоты:

Влияние угла наклона горелки в диапазоне данных (30-90) на высоту отрицательное, что значит с увеличением угла наклона горелки высота уменьшается.

Анализ глубины:

Влияние угла наклона горелки в диапазоне данных (30-90) на глубину положительное, что значит с увеличением угла наклона горелки глубина увеличивается.

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 рассмотрены вопросы, направленные на улучшение характеристик наплавленного покрытия. Процесс подготовки поверхности для нанесения износостойкого слоя включает пять последовательных этапов (Таблица 4). На первом этапе осуществляется механическая обработка поверхности: углошлифовальная машина (УШМ) с абразивным кругом удаляет загрязнения (ржавчина, оксидные пленки), после чего выполняется шлифовка для снижения шероховатости. Второй этап предполагает устранение масляных загрязнений с поверхности. На третьем этапе проводится наплавка с использованием сварочного оборудования — источников питания, подающих механизмов и сварочных горелок, а также аргона в качестве защитного газа для сварочной ванны. Четвертый этап включает удаление брызг и копоти с наплавленного слоя при помощи специализированных инструментов. На заключительном, пятом этапе осуществляется проверка качества покрытия методами визуально-измерительного контроля (ВИК) и дефектоскопии.

Применение предлагаемых технических решений может привести к опасным производственным травмам.

Таблица 4 - 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 операция представленные в таблице 4 в дальнейшем позволят выявить опасные для жизни и здоровья сотруника факторы, за счет чего в дальнейшем можно предложить методы предостарожности от них.

4.2 Анализ неблагоприятных и опасных производственных факторов

При проведении лабораторных исследований следует учитывать потенциальные опасности, связанные с воздействием вредоносных факторов производственной среды на персонал. В процессе экспериментальных работ сотрудники могут подвергаться рискам ухудшения здоровья, обусловленным спецификой технологических операций.

Наибольшую опасность представляют физические факторы рабочей среды, включая ультрафиолетовое излучение, термическое воздействие раскаленных поверхностей и перегретого оборудования, а также влияние

электричества высокого напряжения. Дополнительный риск связан с использованием технологических газов, которые в определенных условиях могут оказывать негативное воздействие на организм человека.

Таблица 5 – Анализ и выявление вредных факторов

Операции	Факторы
Механическая подготовка	Острые кромки, заусенцы, шероховатая поверхность Движущиеся механизм 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	-Металические щетинки, -Движущиеся части оборудования и инструмент, -Повышенная запыленность, -Повышенный шанс вылета окалины из наплавленного слоя
Контроль качевства	-Излучение дуги -Загазованность

Решение по выбору защитных средстви или устранение выявленных опасных и производственных факторов должно операться на анализ из (таблица 5) данных.

4.3 Методика и средства для устранения или минимизирования производственных рисков

На основе анализа вредных производственных факторов были подобраны литературные данные (таблица 6), что позволит на практике снизить уровень травматизма в рабочей среде.

Таблица 6 – Предлагаемые способы снижения влияния вредных условия на человека

Вредные факторы	Организация мероприятий обеспечивающие минимизирование вредных или опасных факторов на здоровье сотрудника
Острые кромки, заусенцы, шероховатая поверхность	1)Проведение вводного инструктажа техники безопасности с последающей переодичностью 2)Оснащение работников рабочей одеждой защищающей от механических и термических воздействий 3) Оснащение рабочего места плакатами и предупреждающими табличками
Движущиеся механизм УШМ	1)Проведение вводного инструктажа техники безопасности с последающей переодичностью 2)Оснощение 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 переодического инструктажа
Ультрафиолетовое излучение инфракрасное	1)Оснощение работников рабочей одеждой защищающей от механических и термических воздействий 2) Защитный щеток, экраны
Повышенный шанс вылета окалины из наплавленного слоя	1)Оснощение работников рабочей одеждой защищающей от механических и термических воздействий 2)Защитные очки, щитки

Решения, приведенные в таблице 6, позволят исключить или снизить воздействие вредных производственных факторов на здоровье человека, тем самым обеспечивая необходимую безопасность при выполнении технологического процесса.

4.4 Обеспечение пожарной безопасности электроустановок

« Согласно СНиП 2.09.02-85 здания и помещения классифицируются на пять категорий (А, Б, В, Г, Д) в зависимости от вида работ, свойств веществ и материалов, а также их взрывопожарной и пожарной опасности. Учебный класс относится к категории Г, что соответствует помещениям с негорючими материалами в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии. Для предотвращения пожаров и взрывов из-за короткого замыкания, перегрузок или иных факторов требуется корректный выбор электрооборудования. Возле сварочных постов размещены огнетушители ОХП-10, ОВП-10, ОУ-2.5-8, пожарные краны и щиты. Пожарные краны, рукава и прочие средства должны постоянно находиться в исправном состоянии» [17].

4.5 Экологическая экспертиза разрабатываемого объекта

«В производственных условиях защита от пылевых и токсичных выбросов достигается за счет снижения их объема, локализации, удаления из воздуха помещений и применения систем очистки. Для минимизации воздействия загрязняющих веществ (ЗВ) на окружающую среду (ОС) используются: сокращение массы выбросов, методы их очистки, а также рассеивание и дистанцирование. При двухдуговой наплавке вредное влияние на экологию ограничивается металлическими парами, образующимися при сварке; их концентрацию можно снизить посредством фильтрации или рассеивания» [17].

4.6 Мероприятия по экологической безопасности

«При выполнении сварочных работ загрязняющие вещества выделяются в минимальных объемах и полностью нейтрализуются вентиляционными

фильтрами. В лабораторных условиях сварка осуществляется без использования летучих вредных компонентов. Это исключает необходимость реализации дополнительных мер по обеспечению экологической безопасности» [17].

4.7 Экологическое управление

Согласно ГОСТ ИСО 14001, внедрение данного стандарта позволяет оптимизировать управление предприятием в части предотвращения негативного воздействия на окружающую среду. Сертификация по ИСО 14001 также способствует сокращению энергопотребления и рациональному использованию ресурсов за счет внедрения экологически ориентированных мероприятий. Для лаборатории допустима установка фильтров на вытяжных системах, предотвращающих попадание в атмосферу веществ, образующихся при сварке. Однако уровень вредных веществ, оказывающих негативное влияние на окружающую среду, близок к нулю.

5 Экономическая эффективность проекта

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

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

Таблица 7 - 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

«Производиться расчет экономической эффективности с учетом производственных затрат. Поскольку работа является научно-исследовательской, производственные затраты будут текущими. Формула для расчета взяты из методических указаний» [18].

«Расчет текущих затрат производится по следующей формуле» [18].

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

«где ЗМ - затраты на основные и вспомогательные материалы» [18].

«ФЗП - фонд заработной платы (основная и дополнительная заработная плата научно– технического персонала» [18].

«Ос.н - отчисления на социальные нужды» [18].

«Зэ-э - затраты на электроэнергию для выполнения исследований» [18].

«Зоб - затраты, связанные с эксплуатацией оборудования» [18].

«Зпр - прочие затраты, в которые входит аренда помещений, приобретение образцов или макетов» [18].

«НР - накладные расходы (расходы на оплату работы управленческого персонала и охрану труда)» [18].

«Затраты на основной и вспомогательный материал вычисляются по следующей формуле:» [18].

$$ЗМ = ЗМосн + ЗМвсп \quad (2)$$

«ЗМосн - затраты на основной материал» [18].

«ЗМвсп - затраты на вспомогательный материал» [18].

«Затраты на основной материал рассчитываются по формуле:» [18].

$$ЗМосн = Нр + Цм + U, \quad (3)$$

«где Нр - норма расхода основного материала на 1 образец для испытаний» [18].

«Цм - оптовая цена 1 кг основного материала» [18].

«U - количество образцов, шт» [18].

«Затраты на вспомогательный материал принимаем равными 20% от затрат на основной материал:» [18].

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

В процессе формирования экономической главы выпускной квалификационной работы, были проведены анализы интернет-источников,

откуда была взята информация, что стоимости 1 кг стали марки Ст3 равна 68 рублей.

Так же цена одной 5 килограммовой катушки присадочной проволоки марки ER70S-6 ровняется 1300 рублей.

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

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

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

«Затраты на заработную плату научно– технического персонала:» [18].

$$ФЗП= ЗПЛосн+ ЗПЛдоп \quad (5)$$

«ЗПЛосн - основная заработная плата научно–технического персонала» [18].

«ЗПЛдоп - дополнительная заработанная плата научно - технического персонала» [18].

«Основная заработная плата вычисляется по формуле:» [18].

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

«ΣТраб− суммарное время работы каждого участника НИР по всем этапам (в днях)» [18].

«Сд − дневная ставка каждого участника НИР, руб.» [18].

«Кпр − коэффициент премиальных доплат (можно принять =1,5)» [18].

«И− количество исполнителей на каждом этапе, чел» [18].

«Дополнительная заработная плата определяется по формуле:» [18].

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

$$ЗПЛдоп = 0.1×6750=675руб$$

$$ФЗП= 6750+675=7425руб$$

«Отчисления на социальные нужды вычисляем по формуле:» [18].

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

«где Нсоц - норма отчислений на социальные нужды = 30%» [18].

$$Ос.н = \frac{Нсоц \cdot ФЗП}{100}$$

«Затраты на электрическую энергию для проведения испытаний:» [18].

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

«где Моб - мощность оборудования (14 КВт)» [18].

«tисп - время проведения испытаний, час» [18].

«ή - коэффициент полезного действия оборудования (0,85)» [18].

«Цэ-э - цена 1 кВт·часа электроэнергии = 5,04 руб.» [18].

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

«Затраты, связанные с эксплуатацией оборудования:» [18].

Зоб = Аоб + Рт.р (10)

176.6+84.3=260.9 руб

«где Аоб - амортизационные отчисления, связанные с эксплуатацией оборудования» [18].

«Рт.р - расходы на текущий ремонт оборудования» [18].

«Затраты на амортизацию оборудования определяем по формуле:» [18].

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

«где На - норма амортизации по применяемому технологическому оборудованию, 24 %» [18].

«ΣЦоб - суммарная цена оборудования, необходимого для проведения испытаний, руб.» [18].

«Фэф - эффективный фонд времени работы оборудования (можно принять равным 1984 часа)» [18].

«tисп - время проведения испытаний, час» [18].

«Стоимость оборудования, которое использовалось приведены в (таблице 8)» [18].

«Таблица 8 - Наименование и цены предоставленного оборудования» [18].

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

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

«Расходы на ремонт оборудования:» [18].

$$ΣЦоб\frac{Нт.р * кз}{Фэф * 100}(12)$$

«где Нр – норма отчислений на текущий ремонт оборудования (принимаем равный 35%)» [18].

«Кз − коэффициент загрузки оборудования» [18].

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

$$Кз = \frac{1}{1}$$

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

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:» [18].

$$Зпр = 0,05 \cdot ФЗП (14)$$

Зпр = 0.05×7425=371.25руб

«Накладные расходы (расходы на оплату работы управленческого персонала и на охрану труда) принимаем в размере 55% от величины фонда заработной платы научно – технического персонала:» [18].

$$НР = 0,55 \cdot ФЗП (15)$$

НР = 0.55×7425=4083.75руб

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

Проведен анализирующий расчет финансовых затрат на исследование двухдугового способа нанесения интерметаллидных покрытий.
Итоговые результаты продемонстрированы в (таблице 9)

Таблица 9 – Основные затраты на проведение лабороторных 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

Настоящая выпускная квалификационная работа посвящена исследованию процессов двухдуговой наплавки интерметаллидных сплавов системы железо-алюминий с целью повышения качества формирования износостойких покрытий. В качестве базовой технологии рассмотрены традиционные методы нанесения алюминидов железа, такие как горячее изостатическое прессование, вакуумное конденсационное напыление, газопламенное и плазменное напыление, лазерная наплавка. Анализ выявил их характерные ограничения, включая высокую стоимость оборудования, низкую производительность, ограниченную толщину покрытий и сложность масштабирования.

В исследовательской части обоснован выбор двухдуговой наплавки как перспективного метода, сочетающего высокую производительность, экономическую эффективность и возможность формирования покрытий с заданными геометрическими параметрами. Разработана методика экспериментального исследования влияния режимов наплавки (сила тока, напряжение, скорость подачи проволоки, угол наклона горелки) на структуру и свойства покрытий. Экспериментально изучены закономерности формирования наплавленных валиков, определены оптимальные диапазоны параметров, обеспечивающие стабильность процесса и минимальную дефектность.

В разделе безопасности предложены меры по минимизации производственных рисков, включая защиту от ультрафиолетового излучения, теплового воздействия и токсичных выделений. Экологическая экспертиза подтвердила низкое воздействие технологии на окружающую среду при условии использования систем фильтрации. Экономический анализ продемонстрировал целесообразность внедрения метода за счет снижения эксплуатационных затрат и доступности оборудования.

Результаты работы позволяют рекомендовать двухдуговую наплавку для промышленного применения в машиностроении, авиационной и энергетической отраслях при восстановлении изношенных поверхностей и нанесении жаростойких покрытий. Разработанные решения способствуют расширению использования интерметаллидных сплавов системы Fe-Al в качестве экономичных альтернатив дорогостоящим материалам.

Список используемой литературы

1. Агеев С. В., Гиршов В. Л. Горячее изостатическое прессование в порошковой металлургии //Металлообработка. – 2015. – №. 4 (88). – С. 56-60.

2. Агеев С. В., Гиршов В. Л. Горячее изостатическое прессование металлических порошков //Металлург. – 2015. – №. 8. – С. 18.

3. Артюхов, Д. А. Анализ влияния параметров и условий сварки на формирование сварного соединения / Д. А. Артюхов // Материалы 79-й студенческой научной конференции : сборник статей, Брянск, 18–22 марта 2024 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2024. – С. 339-341.

4. Барзыкин Д. Р., Мамченкова А. А. Лазерная наплавка //Образование, наука, производство. – 2015. – С. 1609-1614.

5. Басов Ю. А., Ламонин Е. Д., Шихалев К. А. Обзор наиболее распространённых методов нанесения защитных покрытий //Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития. – 2020. – С. 331-337.

6. Бирюков В. и др. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ И НАПЛАВКИ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОВ И МАШИН //Станкоинструмент. – 2017. – №. 4. – С. 42-47.

7. Бочкарев А.Г. Исследование процессов наплавки жаростойких покрытий системы железо-алюминий // Репозиторий Тольяттинского Государственного Университета URL: http://hdl.handle.net/123456789/4604 (Дата публикации 2017).

8. Бочкарев А.Г. Публикации РГБ (переводы и перефразирования) URL: http://dlib.rsl.ru (Дата обращения 01.01.2016).

9. Бувин Е. П. и др. СПОСОБ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ. – 1994.

10. Буйносов А. П. Восстановление в депо профиля бандажей промышленных электровозов с помощью наплавки без выкатки колесных пар //Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2013. – Т. 6. – №. 5. – С. 543-554.

11. Васильев В. И., Ильященко Д. П., Павлов Н. В. Введение в основы сварки //Томск: Издво Томского политехнического университета. – 2011.

12. Власов С. Н., Родионов Е. В. Применение в производстве технологии нанесения покрытий вакуумной металлизацией //Сборник методических рекомендаций по вопросам развития технических и естественных наук. – 2019. – С. 90-96.

13. Елсуков С. К. и др. Влияние параметров наплавки расщепленным электродом на формирование наплавленного металла системы Ni-Cr-Mo-Nb //Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2018. – №. 3. – С. 102-108.

14. Емелин, В. И. Торообразный эластичный привод для внутритрубных работ : монография / В. И. Емелин ; В.И. Емелин, Р.М. Авдеев ; под ред. В.И. Емелина ; Федеральное агентство по образованию, Красноярский гос. технический ун-т. – Красноярск : КГТУ, 2005. – 167 с.

15. Ерофеев В. В. и др. Определение оптимальных режимов плазменной порошковой однопроходной наплавки рабочих поверхностей запорной трубопроводной арматуры //АПК России. – 2019. – Т. 26. – №. 1. – С. 75-81.

16. Зубков М. С. Преимущества и недостатки газотермического напыления //Инновационные технологии в машиностроении: сборник

трудов IX Международной научно-практической конференции, 24–26 мая 2018 г., Юрга.—Томск, 2018. – 2018. – С. 46-48.

17. Зюбин Д.В. Новая методика определения химического состава наплавленного металла при дуговой сварке // Репозиторий Тольяттинского государственного университета. URL: http://hdl.handle.net/123456789/3093 (Дата публикации 2017).

18. 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.

19. Кузьмин В. И. и др. Плазменное напыление износостойких покрытий из порошков самофлюсующихся сплавов //Вестник Югорского государственного университета. – 2015. – №. 2 (37). – С. 45-52.

20. Латыпов Р. А., Денисов В. А., Агеев Е. В. Исследование и разработка технологии восстановления вала ротора турбокомпрессора электроискровой обработкой электроэрозионными наноматериалами //Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – №. 2 (5). – С. 141-146.

21. Ленивкин В. А., Киселев Д. В. Импульсно-дуговая сварка с прерывисто-струйным переносом металла //Сварка и диагностика. – 2014. – №. 3. – С. 25-28.

22. Ленивкин В. А., Киселев Д. В., Паршин С. Г. Способы снижения величины тока мелкокапельного и струйного переноса металла при сварке в аргоне //Сварка и диагностика. – 2010. – №. 5. – С. 8-13.

23. Мамадалиев Р. А. и др. Влияние режимов и скорости процесса сварки на содержание легирующих элементов в сварочном шве //Территория Нефтегаз. – 2019. – №. 3. – С. 74-78.

24. Поварова К. Б., Банных О. А. Принципы создания конструкционных сплавов на основе интерметаллидов //Материаловедение. – 1999. – Т. 2. – С. 27-32.

25. Пряхин И. В., Давиденко О. Ю. Перспективные методы повышения эксплуатационных свойств подшипников качения путем нанесения покрытий на рабочие поверхности //Успехи современного естествознания. – 2009. – №. 12. – С. 34.

26. Садыков И. Д. Характер переноса электродного металла при использовании инверторных и диодных источников питания //Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи, г. Юрга, 7-9 апреля 2016 г. Т. 1.— Томск, 2016. – Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 1. – С. 109-111.

27. Сазонов Е. В., Куликов М. Е., Грашков С. А. Комплексная лазерная наплавка //ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА. – 2022. – С. 142-147.

28. Семистенов Д. А., Ковтунов А. И., Плахотный Д. И. Двухдуговая наплавка железо-алюминиевых сплавов //ИННОВАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ И ТРАНСПОРТЕ. – 2016. – С. 277-282.

29. Синельников, В.С. Алюминиды / В.С. Синельников, В.А. Поддергин, В.Н. Речкин. – Киев : Науковая думка, 1965. – 657 с.

30. Труханов К. Ю. и др. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВАЛИКОВ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА НА НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ //Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2017. – №. СВ1. – С. 42-51.

31. Хаскин В. Ю., Шелягин В. Д., Бернацкий А. В. Современное состояние и перспективы развития технологий лазерной и гибридной наплавки (Обзор) //Автоматическая сварка. – 2015. – №. 5-6. – С. 30-33.

32. Хромов В. Н., Зайцев С. А. Технология упрочнения лап культиватора газопламенным напылением //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. – №. 4. – С. 37-41.

33. 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.

34. Щербаков Ю. В., Кашфуллин А. М. Современные способы восстановления и упрочнения деталей. – 2018. – С. 80-81.

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

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

37. 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 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.

38. 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.

39. 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.

40. He H. et al. Evolution of intermetallics between solid Fe-Cr/Fe-Ni alloys and molten aluminium //International Journal of Mechanical Sciences. – 2023. – T. 257. – C. 108549.

41. 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.

42. Lv J. et al. Performance-control-orientated hybrid metal additive manufacturing technologies: state of the art, challenges, and future trends //International Journal of Extreme Manufacturing. – 2024. – T. 6. – №. 3. – C. 032009.

43. Metel A. S. et al. High-entropy target-cathodes obtaining technology for protecting coatings synthesis by vacuum ion-plasma methods //Aerospace MAI Journal. – 2023. – T. 30. – №. 2. – C. 179-187.

44. 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.

45. 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.

46. 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. – T. 55. – №. 24. – C. 245105.

47. Qadir D. et al. A review on coatings through thermal spraying //Chemical Papers. – 2024. – Т. 78. – №. 1. – С. 71-91.

48. Ratha I. et al. Effect of doping in hydroxyapatite as coating material on biomedical implants by plasma spraying method: A review //Ceramics International. – 2021. – Т. 47. – №. 4. – С. 4426-4445.

49. 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.

50. Saager S. et al. High-performance anodes made of metallic lithium layers and lithiated silicon layers prepared by vacuum technologies //Batteries. – 2023. – Т. 9. – №. 2. – С. 75.

51. Shah D. K. et al. Influence of minority charge carrier lifetime and concentration on crystalline silicon solar cells based on double antireflection coating: A simulation study //Optical Materials. – 2021. – Т. 121. – С. 111500.

52. Tan C. et al. Review on field assisted metal additive manufacturing //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2023. – Т. 189. – С. 104032.

53. Wang K. et al. Effect of hot isostatic pressing on microstructure and properties of high chromium K648 superalloy manufacturing by extreme high-speed laser metal deposition //Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Т. 28. – С. 3951-3959.

54. Wu K. et al. Arc characteristic in aluminum alloy double-wire variable polarity double base pulsed gas metal arc welding //Vacuum. – 2025. – Т. 233. – С. 113914.

55. Wu K. et al. Effect of high-frequency phase shift on metal transfer and weld formation in aluminum alloy double-wire DP-GMAW //Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Т. 75. – С. 301-319.

56. Zamani P., Valefi Z., Jafarzadeh K. Comprehensive study on corrosion protection properties of Al2O3, Cr2O3 and Al2O3–Cr2O3 ceramic coatings deposited by plasma spraying on carbon steel //Ceramics International. – 2022. – Т. 48. – №. 2. – С. 1574-1588.

57. Zhao Y., He S., Li L. Application of hot isostatic pressing in nickel-based single crystal superalloys //Crystals. – 2022. – Т. 12. – №. 6. – С. 805.

58. Zhou L. et al. Study on properties of potassium sodium niobate coating prepared by high efficiency supersonic plasma spraying //Actuators. – MDPI, 2022. – Т. 11. – №. 2. – С. 28.

59. Zhou Y. et al. Finite-time SMC-based admittance controller design of macro-micro robotic system for complex surface polishing operations //Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2025. – Т. 92. – С. 102881.