

На правах рукописи



Малютин Константин Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ
ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ ВНЛ-3 В УСЛОВИЯХ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА**

Специальность: 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет»

Научный руководитель: - доктор технических наук, профессор
Овчинников Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: - **Кусманов Сергей Александрович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Московский государственный
технологический университет «Станкин»,
главный научный сотрудник

- **Мухачева Татьяна Леонидовна**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Костромской государственный
университет имени Н.А. Некрасова», доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный
авиационный технический университет имени
П. А. Соловьёва»

Защита диссертации состоится «18» декабря 2025 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д212.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3, ауд. 307Б. Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Сковрцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvorcovasv@mati.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте: https://mai.ru/upload/iblock/293/dvaze08vt0lg1qvsb3o9jqtqagx7jv0k3/Dissertatsiya_Malyutin.pdf

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сковрцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие технологий нанесения износостойких покрытий происходит одновременно с развитием многих отраслей машиностроения. Предъявление высоких требований к деталям, работающим в условиях трения, приводит технологов к все более трудным задачам восстановления деталей и создания функциональных покрытий. Одним из мало изученных направлений в технологиях наплавки является нанесение покрытий наплавкой из порошков кобальтовых сплавов и изучение их свойств.

Кобальт придает сплавам ряд чрезвычайно важных свойств, таких, как износостойкость, сопротивление ползучести, усталостную прочность при высоких температурах и другие. Эти свойства являются привлекательными для их промышленного применения в особо ответственных конструкциях.

Ввиду содержания в кобальтовых сплавах большого количества легирующих элементов (более 35%), наличия тугоплавких элементов и образования сложных карбидов создание наплавленных слоев из этих сплавов сопровождается возникновением трещин в процессе наплавки, высоким содержанием основного материала детали в покрытии, неоднозначностью поведения покрытий при различных температурах из-за изменения атомной структуры кобальта. Эти проблемы часто перекрывает преимущества кобальтовых сплавов перед производителем, поэтому необходимы глубокие исследования особенностей технологии нанесения покрытий из этих сплавов, выбор оптимальных методов и режимов обработки, которые обеспечат требуемое качество покрытий.

Кобальтовые сплавы применяются в качестве материалов для наплавки износостойких покрытий на ответственные узлы, работающие в условиях сухого трения при нагреве до высоких температур и значительных контактных нагрузок. К таким узлам относится башмак посадочного устройства (авиафинишора) самолетов палубного базирования.

В настоящее время технология нанесения износостойкого слоя на башмак посадочного устройства из стали ВНЛ-3 предусматривает ручную аргонодуговую наплавку с присадочным материалом в виде сплава X25H10B8.

Технологический процесс ручной дуговой наплавки неплавящимся электродом износостойкого слоя на поверхности гака включает следующие основные операции. Подготовленный к наплавке башмак закрепляется в приспособлении, которое предотвращает его деформации в процессе обработки.

Затем башмак с приспособлением помещается в нагревательную печь сопротивления, в которой он нагревается до температуры 250–300 °С с выдержкой в течение 1–1,5 часов.

После нагрева башмак извлекается из печи, устанавливается на сварочный стол и производится наплавка. Наплавку осуществляют без перерыва два сварщика. По завершении процесса наплавки башмак разогревается до температуры красного каления (550–650 °С).

Затем башмак вместе с приспособлением помещается в печь, нагретую до температуры 650 °С, выдерживается в течение 4 часов и охлаждается вместе с печью до комнатной температуры.

Отмеченный выше технологический процесс позволяет наплавлять один башмак за смену. При этом качество наплавки зависит от квалификации сварщиков, качества изготовления наплавочного прутка, подготовки поверхности башмака под наплавку, соблюдения температурных режимов охлаждения башмака в приспособлении с печью.

Как показывает производственный опыт, даже строгое соблюдение технологии наплавки не гарантирует предотвращения появления дефектов в наплавленном слое.

При хранении изготовленных башмаков в результате накопления высоких остаточных напряжений наблюдается образование трещин. В отдельных случаях наблюдалось образование трещин в наплавленном слое с раскрытием до 0,1 мм. Попытки исправить их подваркой оказались неудачными, так как количество трещин становилось больше. Исследование поведения таких трещин в условиях, имитирующих условия эксплуатации, показали нестабильное влияние влияния их на работоспособность башмака.

Анализ технологического процесса изготовления башмака пока показывает, что его совершенствование возможно в двух направлениях – автоматизация процесса наплавки при использовании более концентрированных источников нагрева и разработке наплавочных материалов, обеспечивающих больший срок эксплуатации башмаков.

Из существующих в настоящее время методов наплавки для разработки технологического процесса создания износостойкого покрытия на рабочей поверхности башмака в наибольшей степени отвечает процесс лазерной газопорошковой наплавки. Этот метод позволит наносить покрытия из кобальтового сплава не только с сохранением свойств исходного наносимого материала, но и улучшить его свойства за счет больших скоростей охлаждения, а также обеспечивает возможность автоматизации процесса.

В этой связи становится весьма актуальным исследование влияния процесса газопорошковой лазерной наплавки сплава X25H10B8 на поверхность стали ВНЛ-3 на структуру и свойства наплавленного слоя.

Степень разработанности темы. Большой вклад в решение проблемы повышения износостойкости деталей за счет наплавки слоев с особыми свойствами внесли ученые Сидоров А.И., Ткачев В.Н., Латыпов Р.А., Багрянский К.В., Петров А.В., Зусин В.Я., Гладкий П.В., Соснин Н.А., Лялякин В.П., Хасун А, Мorigaки О. и другие.

Целью диссертационной работы является повышение износостойкости башмаков посадочных устройств при высокотемпературном воздействии за счет рационального выбора режимов широкополосной газопорошковой наплавки со сканированием луча и состава наплавочных порошков.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести анализ причин возникновения трещин в наплавленных слоях стали ВНЛ-3 при ручной аргодуговой наплавке кобальтовым сплавом Х25Н10В8.
2. Изучить влияние дефектов в виде трещин и пор в наплавленном слое на износ при трении образцов стали ВНЛ-3 с покрытием из сплава Х25Н10В8.
3. Определить возможность применения широкополосной лазерной газопорошковой наплавки со сканированием луча для формирования наплавленных слоев на поверхности стали ВНЛ-3.
4. Установить зависимость геометрических параметров наплаваемых валиков от параметров режима широкополосной лазерной газопорошковой наплавки со сканированием луча и установить диапазоны основных параметров режима, обеспечивающих получение бездефектных наплавленных слоев.
5. Исследовать структуру и свойства образцов стали ВНЛ-3, подвергнутых широкополосной лазерной газопорошковой наплавки со сканированием луча.
6. Определить весовой износ при комнатной и повышенных температурах образцов стали ВНЛ-3 после широкополосной лазерной газопорошковой наплавки со сканированием луча на рациональных режимах.
7. Разработать технологические рекомендации по применению широкополосной лазерной газопорошковой наплавки со сканированием луча для получения износостойких покрытий на башмаках посадочного устройства из стали ВНЛ-3.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлено, что образование трещин в наплавленном слое из сплава Х25Н10В8 на подложку из стали ВНЛ-3 ручным аргодуговым методом происходит в процессе остывания заготовки в интервале температур 320–450°С, что обусловлено формированием высокого уровня растягивающих напряжений 500–550 МПа в приповерхностных слоях и обогащением наплавленного слоя водородом, содержание которого примерно в 8–10 раз превышает его содержание в подложке из стали ВНЛ-3.
2. Определено, что нанесение наплавки ручным аргодуговым методом приводит к снижению в 9–10 раз долговечности подложки из стали ВНЛ-3 при циклических нагрузках, а при лазерной широкополосной газопорошковой наплавке только в 2–3 раза, что обусловлено более интенсивным нагревом подложки при ручной аргодуговой наплавке, и как следствие большим растягивающими напряжениями в наплавленном слое.
3. Показано, что введение в порошок для лазерной газопорошковой наплавки буры в количестве 12–17 мас. % (каких %) позволило без существенного снижения износостойкости и твердости, в 3 – 4 раза снизить шероховатость наплавленного слоя.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Разработаны технологические режимы лазерной газопорошковой наплавки сканирующим излучением подложки из стали ВНЛ-3 сплавом Х25Н10В8. При значении скорости наплавки порядка 9,5–11,0 мм/с при постоянной мощности излучения $P = 2500$ Вт и расходе порошка $F = 8$ г/мин можно получить валики с требуемыми геометрическими характеристиками.

2. Разработанная технология нанесения наплавленного слоя из сплава Х25Н10В8 может быть использована для восстановления и упрочнения рабочих поверхностей изделий из сталей, эксплуатирующихся в условиях трения при повышенных температурах.

3. Разработан и опробован технологический процесс упрочнения и восстановления рабочих поверхностей башмака посадочного устройства широкополосной газопорошковой лазерной наплавкой. Разработано оборудование для проведения реновации башмаков посадочного устройства с контролем геометрических параметров нанесения наплавленного слоя. Проведенные стендовые испытания показали, что применение широкополосной газопорошковой наплавки со сканированием луча позволяет в 1,4–1,5 раза повысить износостойкость рабочих поверхностей башмаков и снизить процент бракованных изделий с 60% до 2%, что подтверждено актом.

4. Результаты работы были внедрены в учебно-образовательный процесс подготовки бакалавров по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», что подтверждено актом.

Положения, выносимые на защиту:

1. Механизм образования и развития трещин в наплавленном слое стали ВНЛ-3, а также расположение очагов разрушения.

2. Влияние распределения остаточных растягивающих напряжений и содержания водорода в наплавленном слое на образование в нем трещин.

3. Экспериментально обоснованные режимы широкополосной газопорошковой лазерной наплавки со сканированием луча, обеспечивающие получение износостойких наплавленных слоев с высокой плотностью и износостойкостью.

4. Закономерности изменения структуры и свойств наплавленного слоя при введении флюса в виде буры в количестве 12–17 мас. % в порошки для широкополосной газопорошковой наплавки.

Методы исследования и достоверность полученных результатов.

Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных ученых, государственные стандарты РФ.

Результаты экспериментальных исследований получены с использованием современных методов исследования структуры и свойств материалов, а также сертифицированного испытательного оборудования. Показана воспроизводимость результатов.

Реализация результатов работы.

Результаты диссертационной работы внедрены в технологический процесс изготовления и реновации башмаков посадочных устройств. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении

исследований по Государственному контракту на выполнение работ для государственных нужд Российской Федерации №FZRR-2023-0005 «Разработка основополагающих технологических принципов применения концентрированных потоков энергии для получения новых импортозамещающих композиционных материалов специального назначения на основе систем несмешивающихся компонентов».

Степень достоверности результатов.

Все результаты получены на современном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Стандартные испытания и исследования проводились в соответствии с требованиями научно-технической документации, действующей на территории Российской Федерации (ГОСТ и ISO). Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации подтверждены теоретическими решениями и экспериментальными данными.

Апробация работы.

Результаты работы доложены и обсуждены на девяти научных конференциях, в том числе: Межвузовский международный конгресс «Высшая школа: научные исследования» (Москва, 29.04.2021); Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии обработки материалов» (г. Курск, 14.02.2020, Юго-Западный государственный университет); Всероссийская научно-практическая конференция «Разработка и применение наукоемких технологий в интересах модернизации современного общества» (28.03.2024 г., г. Киров); X Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы современных научных исследований» (25.03.2024 г., г. Пенза); Международная научно-техническая конференция «СМиС-2024. Технологии управления качеством», 22–24 мая 2024 г., Москва); X Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современных научных исследований» (25 марта 2024 г. в г. Пенза.

Личный вклад автора состоит в его непосредственном участии в формулировании цели и задач исследования, в реализации теоретических и экспериментальных исследований, анализе и обработке полученных результатов, обобщении результатов экспериментов, формулировке рекомендаций и выводов по диссертации, а также подготовке публикаций в научно-технических журналах и докладов на научных конференциях.

Публикации: Основное содержание работы отражено в 15 научных работах, в том числе в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК РФ, из которых 2 переведены в журналах, включенных в международные системы цитирования Scopus и/или Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы (111 наименований) и содержит 195 страниц машинописного текста, в том числе 87 рисунков, 32 таблицы и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности диссертационной работы, приведены формулировки цели и задач исследований, представлены основные научные положения, выносимые на защиту, и практическая значимость работы.

В главе 1 приведен анализ применяемых конструкций посадочных устройств самолетов палубного базирования. Для посадки самолетов на палубу используется посадочное устройство, состоящее из тормозного троса и посадочного гака с башмаком самолета. Посадочный гак – это мощная балка с крюком на конце, которым она цепляется за трос палубного тормозного устройства. Крючок называют башмаком посадочного гака. При посадке башмак скользит по металлической палубе и его подошва подвержена ускоренному износу.

Еще большую нагрузку испытывает центральная часть башмака, где размещается трос палубного тормозного устройства. При незначительном смещении самолета от середины троса он начинает скользить по канавке башмака под большой нагрузкой. Поверхность башмака нагревается до высоких температур (порядка 800–950 °С).

Предварительно проведенные эксперименты показали, что слой износостойкого покрытия, наносимый на поверхность контактной канавки, должен иметь толщину не менее 2 мм. Износостойкие слои такой толщины наносятся уже наплавкой. Рабочая зона башмака, предназначенная для наплавки, имеет сложную поверхность двойной кривизны. Поэтому посчитали, что наиболее приемлемым способом будет ручная аргонно-дуговая наплавка с присадочным материалом X25H10B8.

Технологический процесс ручной дуговой наплавки неплавящимся электродом износостойкого слоя на поверхности башмака включает следующие основные операции. Подготовленный к наплавке башмак закрепляется в приспособлении, которое предотвращает его деформации в процессе обработки. Затем башмак с приспособлением помещается в нагревательную печь сопротивления, в которой он нагревается до температуры 250–300 °С с выдержкой в течение 1–1,5 часов.

После нагрева башмак извлекается из печи, устанавливается на сварочный стол и производится наплавка. Наплавку осуществляют без перерыва два сварщика. По завершении процесса наплавки башмак разогревается до температуры красного каления (550–650 °С). Затем башмак вместе с приспособлением помещается в печь, нагретую до температуры 650 °С, выдерживается в течение 4 часов и охлаждается вместе с печью до комнатной температуры.

Перспективным направлением реализации процесса наплавки является применение лазерного луча для расплавления наносимого слоя на поверхность подложки. Путем нанесения слоя на слой можно получать покрытия достаточно большой толщины без перегрева основного материала.

Применение порошковых материалов позволяет управлять в широких пределах толщиной наносимого слоя, а также создавать на поверхности различные материалы, в частности композиционные и градиентные. Поимому, имеется возможность применения порошков с различным размером частиц.

Таким образом, проведённый литературный обзор показывает, что процесс лазерной наплавки является весьма универсальным и высокотехнологичным методом для ремонта и восстановления башмака посадочного устройства.

В связи с этим в данной работе была поставлена актуальная задача разработки и создания технологии порошковой наплавки лазерным методом износостойкого покрытия на башмак посадочного устройства (авиафинишора).

Проведенный обзор позволил сформулировать цель и задачи исследований.

В главе 2 приведено описание применяемого в исследованиях технологического и аналитического оборудования, а также методик проведения экспериментов.

В данном исследовании рассмотрены особенности наплавки износостойкого слоя на подложку стали ВНЛ-3. Сталь 08X14H5M2ДЛ (ВНЛ-3) – это сталь коррозионностойкая высокопрочная мартенситного класса.

В качестве наплавляемых материалов использовались порошки Х25Н10В8 и ВХН-1. Износостойкие кобальтовые сплавы относятся к системе Co–Cr–W, причем содержание хрома в сплавах этой группы является наибольшим по сравнению с другими, так как он имеет ключевое значение в образовании карбидов с различным соотношением Cr/C. При аргонодуговой наплавке наплавляемый материал используется в виде прутка. Для нанесения покрытий лазерной газопорошковой наплавкой был использован порошок из кобальтовых сплавов дисперсностью 60–75 мкм.

Наплавку образцов осуществляли ручной аргонно-дуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом. Режим наплавки: ток дуги – 100–110 А; количество проходов – 5; расход аргона – 10–12 л/мин; диаметр электрода Х25Н10В8 – 4 мм; ВХН-1 – 6 мм. Питание дуги осуществлялось постоянным током от источника «Форсаж-315».

Эксперименты по нанесению покрытий методом широкополосной коаксиальной лазерной наплавки проводили на специально созданном технологическом комплексе. Основными элементами стенда являются: промышленный робот АBBIRB 2400; волоконный лазер ЛС-4-К; оптическая головка; газовая панель; питатель для подачи порошка. Для отработки технологии нанесения покрытий были использованы образцы из стали ВНЛ-3 толщиной 12 мм и размером 100x100 мм.

Для проведения измерений геометрических параметров поперечного сечения валиков пластину разрезали в поперечном направлении на отрезном станке ПОЛИЛАБ Р80. Изготовление шлифов для металлографических исследований осуществляли путём вырезки из валиков проб размером 5x10 мм.

Полученные пробы запрессовывали в оправку на прессе SimpliMet-1000. Запрессованные и залитые образцы шлифовали на шлифовально-полировальном станке BUEHLER comet-250. Запрессованные и залитые образцы шлифовали на шлифовально-полировальном станке BUEHLER comet-250.

Для травления всех шлифов применяется раствор Марбле. Шлиф при травлении протирают ватным тампоном до потускнения поверхности и промывают под струей воды и сушат фильтровальной бумагой. Исследование микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Olympus GX-51.

Фазовый состав наплавленного сплава определяли методом рентгенодифракционного анализа на рентгеновском микроскопе. Съемку проводилась в $\text{CoK}\alpha$ -излучении в режиме непрерывного сканирования со скоростью 0,01° в интервале углов $2\theta = 30\text{--}125^\circ$. Период кристаллической решетки кобальтового твердого раствора определялся по дифракционному максимуму (311) с погрешностью $\pm 0,0004 \text{ \AA}$.

В данных исследованиях использовался просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100 предназначенный для визуального и фотографического исследований фазового состава и кристаллической структуры объектов. Исследования проводились в режиме: напряжение питающей сети 380/220 В, частота 50 Гц.

Метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) позволяет проводить количественный морфологический анализ и измерение линейных размеров микрорельефа поверхности твердотельных структур. В исследованиях применялся электронный микроскоп фирмы “Carl Zeiss” марки evo-50 и SEM 515 «Philips».

Исследование образцов проводится на микротвердомере DuraScan 20. Прибор автоматически производит измерения твердости приповерхностного слоя образцов с максимальной нагрузкой 98 Н. Он имеет сенсорный экран и 3 координатный механический стол. Обработка измерений осуществляется автоматически по программе Ecos Workflow.

Трибологические испытания образцов проводили методом измерительного скольжения на автоматизированной машине трения (трибометре) TRIBOMETER фирмы CSM Instruments (Швейцария), № 44739-10 в Государственном реестре средств измерений (ГРСИ), с возвратно-поступательным движением по схеме стержень-пластина в соответствии с Методикой выполнения измерений коэффициента трения f и износа I на трибометре Tribometer фирмы CSM (Швейцария). Данные испытания соответствуют международным стандартам (ASTMG99-05(2010), ASTMG133-05(2010), DIN50324) и могут быть использованы для оценки износостойкости образца и контртела.

Исследование профиля поверхности образцов проводились на профилометре HOMMEL-ETAMIC8000.

Штифтодисковые испытания трибологических свойств проводились с помощью штифтодискового трибометра THT800 Anton Paar при температурах 24°C (комнатная температура), 100–900 °C.

В главе 3 рассмотрены результаты исследования причин образования дефектов в наплавленном слое при ручной аргонодуговой наплавке. Были выполнены металлографические исследования башмаков посадочных устройств из стали ВНЛ–3 с ручной аргонодуговой наплавкой Х25Н10В8 с трещинами как продольными, так и поперечными относительно направления наплавки.

На поперечным темплетам, вырезанных из мест с трещинами, обнаружено, что трещины располагаются в наплавке, их развитие в основной материал не наблюдается. Строение изломов указывает на то, что образование трещин происходило при повышенных температурах в процессе остывания материала наплавки, т. е. исследуемые трещины являются «теплыми».

Предварительно на макрообразцах размером 5x10 мм исследовалось содержание диффузионно-подвижного водорода (отдельно в материале наплавки, в стали ВНЛ–3, вырезанной из башмака посадочного устройства, и в стали ВНЛ–3 с нанесенной наплавкой). Экстракция проводилась при температурах 520, 600 и 900 °С, а также при непосредственном расплавлении металла детали из стали ВНЛ-3.

Было установлено, что необезводороженная сталь ВНЛ–3 может содержать повышенное количество диффузионно-подвижного водорода – до 1,5 см³/100 г. Обезводороживание стали ВНЛ–3 снижает концентрацию диффузионно-подвижного водорода до 0,1–0,5 см³/100 г.

В образцах стали ВНЛ–3, вырезанных из необезводороженного башмака при 0 и 30% наплавки (дегазация при 520 °С), обнаружено 0,6–1,3 см³/100 г диффузионно-подвижного водорода, при 80% наплавки содержание диффузионно-подвижного водорода ~1,0 см³/100 г (дегазация при 520 °С + 600 °С). Содержание диффузионно-подвижного водорода в металле наплавки составляет 0,9 см³/100 г (дегазация при 600 °С), а содержание общего водорода (метод плавления) весьма велико ~9,0 см³/100 г. Также велико содержание общего водорода в образцах, вырезанных из башмака посадочного устройства при 80% наплавки – около 11,0 см³/100 г.

Установлено, что содержание общего водорода в наплавке на необезводороженный башмак примерно такое, как и для наплавки обезводороженного башмака, и во всех случаях выше, чем на стали ВНЛ–3.

Следует отметить, что наибольшие растягивающие остаточные напряжения возникают не в наплавленной области, а в зонах, прилегающих справа и слева по оси башмака от зоны наплавки, т.е. в основном металле. Близко к линии сплавления в основном металле продольные растягивающие напряжения достигают своего максимума – 182 МПа. Зона с растягивающими напряжениями имеет протяженность около 130 мм.

В наплавленном слое наблюдается достаточно высокий уровень сжимающих напряжений, достигающих значений 500–550 МПа вблизи поверхности. На расстоянии, соизмеримом с толщиной наплавленного слоя (примерно 5–7 мм), сжимающие напряжения переходят в растягивающие.

Максимальная величина растягивающих тангенциальных напряжений в основном металле достигает 200 МПа.

Характерен достаточно плавный переход сжимающих напряжений в наплавленном слое к растягивающим напряжениям в основе башмака. Максимальные растягивающие напряжения расположены в основном металле на глубине около 20–25 мм от поверхности и равны $\sigma_z = 480$ МПа; $\sigma_\theta = 400$ МПа; $\sigma_r = 240$ МПа.

Испытывались образцы, имитирующие реальное изделие с наплавкой на рабочей поверхности в 4-х вариантах:

А – основной материал сталь ВНЛ-3 без наплавки;

Б – основной материал сталь ВНЛ-3 с наплавкой Х25Н10В8 без трещины;

В – основной материал сталь ВНЛ-3 с наплавкой ВХН-1;

Г – основной материал сталь ВНЛ-3 с наплавкой Х25Н10В8 с трещиной.

Образцы представляют собой полосу размером 12х27х280 мм с утолщением захватных частей до 16 мм на длине 60 мм. Толщина основного материала в зоне наплавки – 8,5 мм. Длина наплавки 60 мм. Наплавка выполнялась без последующей термообработки на полностью термообработанный и газостатированный материал.

Значения напряжений и долговечностей, приведенные к отнулевому циклу нагружений, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты обработки данных испытаний

Номер образца	Напряжения цикла			Число циклов до разрушения			
	σ _{min}	σ _{max}	σ _{ЭКВ}	Фактическое по испытаниям	Среднее по испытаниям	Приведенное	Среднее приведенное
	МПа						
A2	196	800	695	78000	66830	44430	37684
A3	205	800	690	47800		26452	
A4	196	800	695	102100		58157	
A5	200	800	693	52400		29506	
B2	172	790	698	5800	3217	3535	1971
B3	154	708	626	4100		2506	
B4	178	829	735	1400		865	
B2	174	791	699	7000	8827	4269	5394
B3	173	791	699	5900		3598	
B4	174	797	705	9800		6000	
B5	174	797	705	15000		9184	
Г1	174	806	714	1600	1816	985	1119
Г2	174	810	718	1700		1050	
Г3	174	807	715	2200		1356	
Г4	175	600	505	8800	6431	4416	3242
Г5	179	620	523	4700		2380	

В зависимости от применяемого наплавляемого металла наблюдается различное снижение средней приведенной долговечности. По сравнению с исходным вариантом снижение средней приведенной долговечности: при наплавке ВХН-1 – в 7 раз и при наплавке Х25Н10В8 – в 19 раз. У образцов с наплавкой ВХН-1 долговечность выше, чем у образцов с наплавкой Х25Н10В8 без трещины в 2,6 раза.

На образцах с трещиной последняя является инициатором разрушения, причем долговечность до момента страгивания трещины составляет от 25 до 81% от общей долговечности образца.

После страгивания трещины долговечность образца составляет в среднем 900 циклов (эквивалентно отнулевому циклу нагружения).

Располагаясь в наплавленном слое дефекты наплавки могут оказывать существенное влияние и износостойкость наплавленного слоя из сплава Х25Н10В8. Такое влияние может возрасти в условиях трения при повышенной температуре и высоких нагрузках, прикладываемых к деталям в зоне фрикционного контакта.

Испытаниям были подвергнуты образцы в виде дисков диаметром 65 мм и толщиной 10 мм из стали ВНЛ-3, на поверхность которых ручной аргонодуговой наплавкой был наплавлен слой из сплава Х25Н10В8 толщиной 2,5–3 мм. Продолжительность трибологических испытаний составила 31000 кругов для исследуемых покрытий. Общая продолжительность испытания, в зависимости от радиуса дорожки износа, составила от ~ 120 минут до ~ 240 минут.

Испытания при комнатной температуре позволили получить исходные базовые значения коэффициента трения для наплавленных образцов, который составил 0,29–0,32. Массовый износ наплавленных образцов без дефектов в наплавленном слое при полном цикле испытаний в условиях нормальной температуры (20 °С) был на уровне 55,8 мг.

На рисунке 1 приведено влияние дефектов в наплавленном слое на его массовый износ при полном цикле испытаний на износ. Можно отметить, что наибольший износ наблюдается у подложки из стали ВНЛ-3, который составил 128,4 мг. Наплавленный слой из Х25Н10В8 без дефектов на уровне 55,8 мг.

Наличие пористости в наплавленном слое незначительно увеличивает массовый износ до 58,3 мг. В то же время наличие в наплавленном слое трещин приводит к существенному повышению износа.

Наибольшая величина износа отмечена для температуры испытания 900 °С и составила 462,4 мг. Полученные результаты относятся к варианту испытаний наплавленных образцов без дефектов в наплавленном слое. Наличие трещин в наплавленном слое существенно интенсифицирует процесс износа во всем исследованном диапазоне температур. Влияние трещин на износ наплавленного слоя начинает уже проявляться при температурах нагрева 400–500 °С. В то же время в наплавленном слое без дефектов увеличение износа начинается с температуры нагрева 650–700 °С.

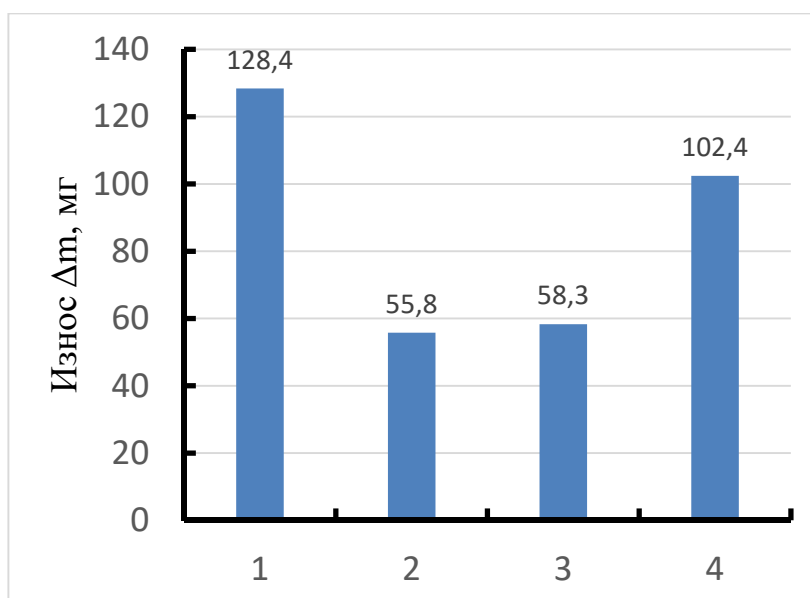


Рисунок 1 – Потери массы образцов при износе:

1 – сталь ВНЛ-3 без покрытия; 2 – наплавленный слой Х25Н10В8 без дефектов;
3 – наплавленный слой Х25Н10В8 с пористостью; 4 – наплавленный слой
Х25Н10В8 с трещинами

В главе 4 представлены результаты исследований процесса лазерной газопорошковой наплавки сканирующим излучением стали ВНЛ-3 сплавом Х25Н10В8.

При значении скорости наплавки порядка 9,5–11,0 мм/с при постоянной мощности излучения $P = 2500$ Вт и расходе порошка $F = 8$ г/мин можно получить валики с требуемыми геометрическими характеристиками.

Результаты исследования микроструктуры и распределения легирующих элементов в наплавленных валиках показали, что с увеличением мощности лазерного излучения коэффициент перемешивания увеличивается. Причина такого увеличения коэффициента перемешивания заключается в увеличении погонной энергии, которая расходуется на проплавление подложки, что в итоге приводит к увеличению площади расплавления подложки и доли ее металла, который участвует в формировании наплавленного валика. Результаты экспериментов второй серии показали, что при всех выбранных значениях мощности лазерного излучения коэффициент перемешивания увеличивался примерно от 0,05 до 0,43. Значение коэффициента перемешивания остается на достаточно приемлемом уровне.

Внешний вид наплавленной поверхности представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Внешний вид наплавленной поверхности на поверхности образца из стали 08Х14Н5М2ДЛ (ВНЛ-3)

Контроль температуры образца с помощью термопары показал, что на глубине 2 мм от наплавляемой поверхности температура нагрева образца в процессе наплавки не превысила 80–90 °С.

На рисунке 3 приведена структура наплавленного слоя при наплавке единичным валиком из материала X25H10B8 на поверхность заготовки из стали ВНЛ-3.

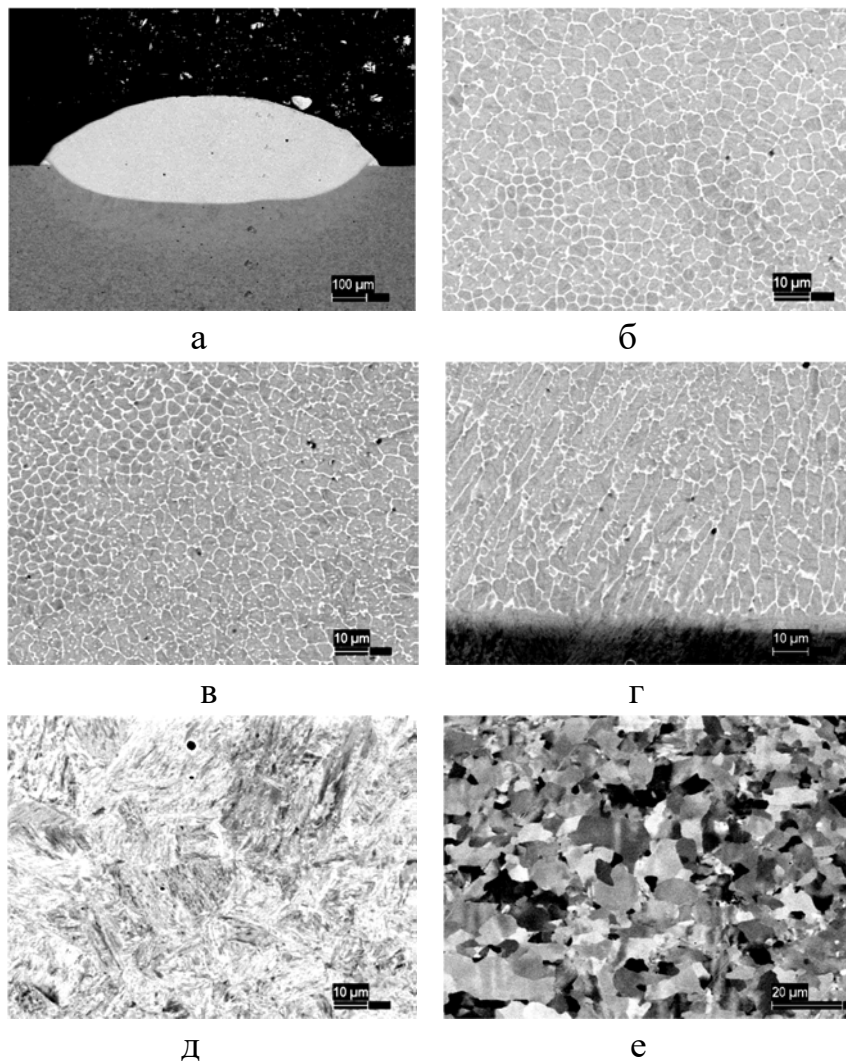


Рисунок 3 – Наплавка одиночного валика: а – общий вид; б – область наплавленного металла в верхней части валика; в – область наплавленного металла в центральной части валика; г – область наплавленного металла валика вблизи с подложкой; д – зона термического влияния подложки; е – структура материала подложки

Результаты исследования одиночного валика показали, что ширина зоны термического влияния (ЗТВ) равна ~350 мкм, структура покрытия – равноосная ячеистая, вблизи границы с подложкой – дендритная структура, границы зерен обогащены тяжелыми элементами (Mo, W). Структура ЗТВ – измельченные ферритно-перлитные зерна со следами частичного мартенситного превращения. Граница подложки и покрытия отчетливая, без отслоений, трещин и пористости.

Показано, с увеличением коэффициента перекрытия уменьшается смешивание материалов подложки и покрытия. Причиной этому служит сужение площади воздействия излучения на подложку при увеличении коэффициента перекрытия. Также увеличение коэффициента перекрытия привело к улучшению стабильности проплавления подложки и росту высоты покрытия.

Установлено, что микротвёрдость меняется на границе наплавленного покрытия и подложки от 6050 МПа (покрытие) до 2300 МПа (материал подложки сталь ВНЛ-3).

Важным показателем качества наплавленного слоя является его пористость. Наличие пор в наплавленном слое покрытия может быть как необходимым, так и не желательным. На продольных шлифах наплавленного слоя после обработки и полирования на глубину 300 мкм от исходной наружной поверхности наблюдались скопления мелких пор. По мере удаления от поверхности на глубину 275 мкм количество пор снижается до 0,3% и они становятся плохо различимыми на поверхности.

На поперечном шлифе поры преимущественного располагаются в верхней части наплавленного слоя. Ближе к линии сплавления наплавленного слоя с подложкой пористость практически полностью исчезает.

При газопорошковой наплавке параллельными валиками с перекрытием 0,66–0,72 между валиками имеет место занижение поверхности наплавки. На ряде изделий это требует применения дополнительной механической обработки для получения наплавленного слоя одинаковой толщины. Альтернативным путем решения указанной проблемы является применение добавок флюсов в наплавляемый порошок. В качестве такого флюса может быть применена бура $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$. В проводимых исследованиях буру подавали в качестве дополнительного компонента в количестве 1–12% в питатель для подачи порошка в наплавочную головку.

Эксперименты показали, что при введении в наплавляемый порошок Х25Н10В8 около 7 масс.% буры $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ наблюдается формирование ровной поверхности наплавленного слоя без границы между отдельными наплавленными валиками (рисунок 4).



Рисунок 4 – Внешний вид наплавленных слоев Х25Н10В8 на сталь ВНЛ-3 при широкополосной наплавке с добавлением 7 масс.% буры в наплавляемый порошок

С увеличением количества введенного флюса в наплавляемый порошок отмечается тенденция к снижению твердости наплавленного покрытия, хотя при содержании флюса на уровне 5–7 мас.% это снижение еще не столь существенно. Причины такого влияния содержания флюса на твердость наплавленного слоя установить не удалось. Можно предположить, что флюс способствует раскислению металла наплавленного слоя, снижению в нем содержания твердых оксидов молибдена и кобальта, что в конечном итоге приводит к снижению твердости слоя наплавки.

В процессе проведения испытаний получена зависимость массового износа наплавленных образцов от температуры испытаний (рисунок 5). Установлено, что примерно до температуры испытаний 350–400 °С наблюдается примерно одинаковый износ как для образцов, выполненных ручной аргонодуговой наплавкой, так и газопорошковой лазерной наплавкой. Дальнейшее увеличение температуры испытаний приводит к увеличению массового износа, значение которого наиболее интенсивно увеличивается начиная с температуры нагрева испытуемых образцов и контртела до температуры 650 °С.

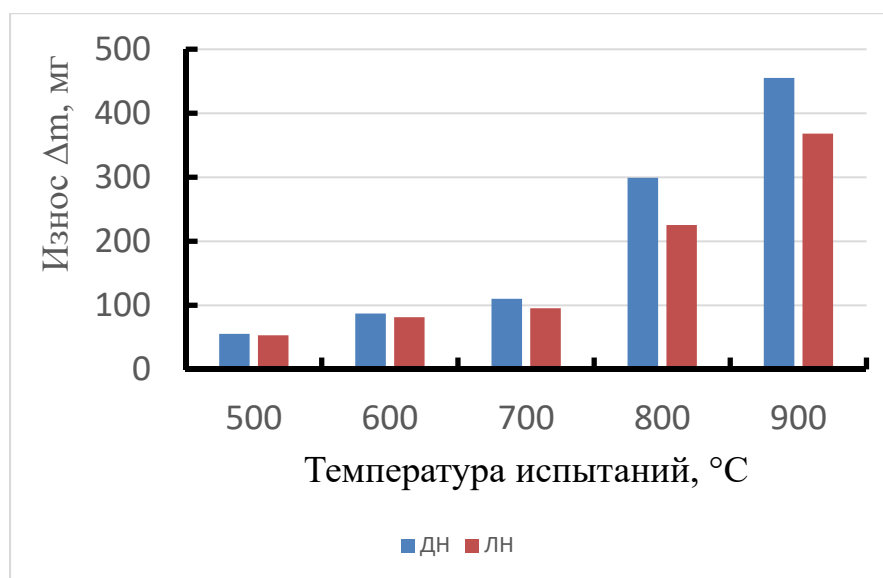


Рисунок 5 – Массовый износ наплавленных образцов стали ВНЛ-3 в зависимости от температуры испытаний (материал наплавленного слоя Х25Н10В8, частота вращения контртела 310 об/мин, удельное давление в трибологическом контакте $0,6 \cdot 10^6$ Па): ДН – ручная аргонодуговая наплавка; ЛН – лазерная газопорошковая наплавка

В результате проведенных испытаний при температуре нагрева 500 °С установлено высокое сопротивление абразивному износу образцов, наплавка которых выполнена лазерной газопорошковой наплавкой (рисунок 6). При этом даже в случае применения порошка с добавлением 7% буры снижением массы образцов меньше, чем при ручной аргонодуговой наплавке.

В отличие от наплавленного слоя, полученного при лазерной газопорошковой наплавке, у покрытия, выполненного ручной аргонодуговой

наплавкой, наблюдается отделение фрагментов покрытия с поверхности, а также ширина полос износа на порядок больше.

В главе 5 уточнены режимы лазерной газопорошковой наплавки сплава X25H10B8 применительно к изделию типа башмак тормозного устройства из стали ВНЛ-3. Определен диапазон изменения основных параметров режима, обеспечивающие многослойную наплавку без дефектов в виде несплавлений на границе наплавленный слой–подложка.

Выполнена газопорошковая лазерная наплавка опытной партии башмаков. Показано, что при данном процессе наплавки температура нагрева тела башмака не превышает 85–90 °С, а время изготовления одного изделия 45–57 минут в зависимости от режима наплавки. В сравнении с существующей технологией ручной аргодуговой наплавки производительность разработанного технологического процесса в 7–8 раз больше.

Стендовые испытания башмаков в условиях, имитирующих условия эксплуатации, показали, что башмаки, изготовленные по существующей технологии, до полного стирания наплавленного слоя выдерживают 58–60 циклов нагружения, а наплавленные лазерной газопорошковой наплавкой – до 74 циклов нагружения. При этом лазерная газопорошковая наплавка практически полностью исключила брак башмаков при наплавке (рисунок 7).

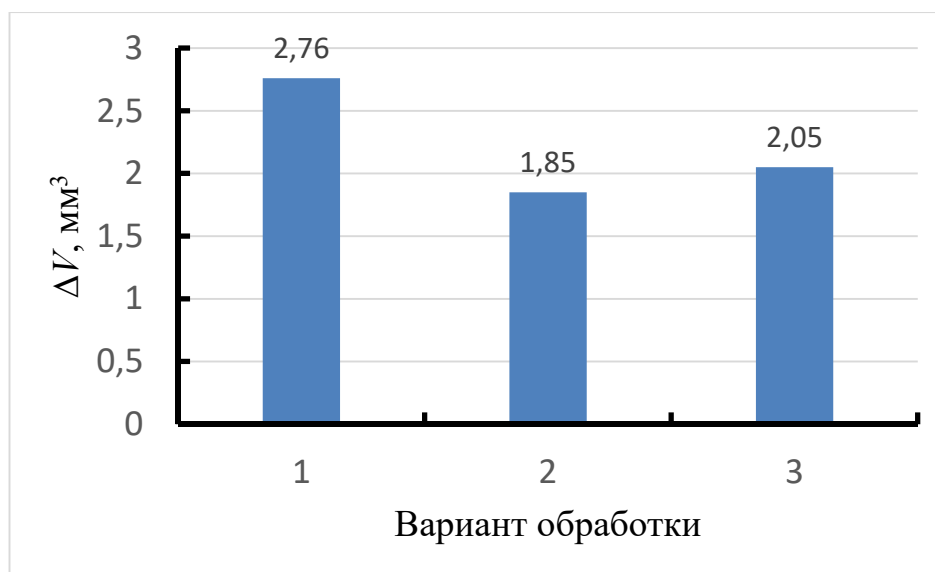


Рисунок 6 – Потеря массы образцов наплавленных образцов после испытаний на абразивное изнашивание при температуре 500 °С:

1 – ручная аргодуговая наплавка сплава X25H10B8; 2 – лазерная газопорошковая наплавка сплава X25H10B8; 3 – лазерная газопорошковая наплавка сплава X25H10B8 с добавлением 7% масс. буры



Рисунок 7 – Башмак тормозного устройства после широкополосной лазерной газопорошковой наплавки

Лазерная газопорошковая наплавка позволяет не только осуществлять наплавку новых изделий, но и ремонт наплавленного слоя на изделиях, прошедших эксплуатацию.

В заключении в обобщенном виде представлены основные результаты диссертации.

В приложении представлены акты об использовании результатов работы в производстве и учебном процессе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. На основе металлографического анализа поверхности изломов наплавленных башмаков тормозного устройства установлено, что образование трещин в условиях ручной аргодуговой наплавки происходит при изготовлении деталей при повышенных температурах на стадии остывания детали. Установлено, что трещины распространяются только в слое наплавки и основной металл подложки не затрагивают.

2. На основании полученных экспериментальных данных установлено, что образование трещин обусловлено наличием пор в слое наплавки, а также обогащением слоя наплавленного металла водородом, частично поступающим в результате диффузии из основного металла. Напряжения в наплавленном слое превосходят на 25% уровень напряжений в подложке и по характеру они являются растягивающими.

3. Непрерывный контроль образцов с трещиной в наплавке из материала Х25Н10В8 в процессе испытаний электропотенциальным методом показал, что технологическая трещина в наплавке начинает проникать в основной металл ВНЛ-3 с приложением циклических нагрузок к детали.

4. Долговечность образцов от момента достижения трещиной основного материала до разрушения составляла в среднем 900 циклов при уровне напряжений 800 МПа. Долговечность от начала нагружений до момента страгивания трещины составляет от общей долговечности образца:

25–28% при $\sigma_{\max} = 800$ МПа (240–300 циклов);

64–81% при $\sigma_{\max} = 600$ МПа (1800–4300 циклов); то есть имеется безопасный ресурс, позволяющий эксплуатировать элемент с технологической трещиной в наплавке.

5. На основании проведенных исследований установлено, что наличие трещин в наплавленном слое существенно (примерно в 3 раза) увеличивает износ при трении образцов по сравнению с образцами без трещин в наплавленном слое при испытаниях при температурах 650–700 °С. С увеличением температуры испытаний до 900 °С наблюдается увеличение износа образцов без дефектов наплавленном слое и снижение влияния трещин на износ (коэффициент составил 1,45–1,50).

6. Показана перспективность применения широкополосной лазерной газопорошковой наплавки со сканированием луча для формирования наплавленных слоев на поверхности стали ВНЛ-3. При значении скорости широкополосной газопорошковой лазерной наплавки порядка 9,5–11,0 мм/с при постоянной мощности излучения $P = 2500$ Вт и расходе порошка $F = 8–9$ г/мин можно наплавленные слои с требуемыми геометрическими характеристиками без внутренних дефектов.

7. Исследование макро- и микроструктуры наплавленных слоев показали, что они имеют строение с хаотическим направлением роста кристаллов. Проявляется поперечное сечение столбчатых дендритов. После окончательного затвердевания свободные дендриты соприкасаются между собой. Кристаллы имеют центральную ось шириной в пределах 1–2 мкм, длина которой варьируется от 5 до 30 мкм. Эта ось по всей длине пересекается множеством двойников с расстоянием друг от друга от 1 до 2 мкм. Структура сплава аустенитно–ледобуритная с включениями сложных карбидов на основе хрома и кобальта с размерами в пределах 1–3 мкм.

8. Определение химического состава на всех наплавленных слоях показало, что наплавленные слои с перекрытием $k = 0,35$ в верхней части наплавки и в её центре содержат ~66,5 мас. % железа, с перекрытием $k = 0,5$ – 62,8 мас.% Fe, с перекрытием $k = 0,72$ – 58,9 мас.% Fe.

9. Наплавленные слои обладают повышенным уровнем микротвёрдости относительно подложки (5200–6500 МПа), наблюдается снижение уровня микротвёрдости при движении к подложке до 2300 МПа. Самыми низкими значениями микротвердости отличается зона термического влияния. Микротвёрдость двухслойного покрытия варьируется на границе покрытия и подложки с 6200 МПа (покрытие) до 2300 МПа (подложка) и ее значение выше на 800–930 МПа, чем микротвёрдость однослойного покрытия с аналогичным коэффициентом перекрытия валиков.

10. Испытания при комнатной температуре позволили получить исходные базовые значения коэффициента трения для наплавленных образцов, который составил 0,29–0,32 для варианта ручной аргонодуговой наплавки и 0,24–0,26 – для лазерной газопорошковой наплавки. Весовой износ наплавленных ручной аргонодуговой сваркой образцов без дефектов в наплавленном слое при полном цикле испытаний в условиях нормальной температуры (20 °С) был на уровне 55,8 мг. Для образцов, полученных лазерной широкополосной газопорошковой

наплавкой в тех же условиях отмечается снижение износа до 50,3–52,1 мг. Наибольшая величина износа отмечена для температуры испытания 900 °С и составила 567,4 мг для варианта ручной аргонодуговой наплавки. Обращает на себя внимание тот факт, что при высоких температурах нагрева при испытаниях величина износа для образцов, наплавленных широкополосной лазерной газопорошковой наплавкой, ниже, чем образцов, полученных ручной аргонодуговой наплавкой.

11. Разработаны технологические рекомендации по применению широкополосной лазерной газопорошковой наплавки со сканированием луча для получения износостойких покрытий на башмаках посадочного устройства из стали ВНЛ-3.

12. Стендовые испытания изделий в условиях, имитирующих условия эксплуатации, показали, что башмаки, изготовленные по существующей технологии, до полного стирания наплавленного слоя выдерживают 58–60 циклов нагружения, а наплавленные лазерной газопорошковой наплавкой – до 74 циклов нагружения. При этом лазерная газопорошковая наплавка практически полностью исключила брак башмаков при наплавке (не более 2% от партии).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Малютин К.В. Исследование причин образования трещин в наплавленном слое стали 08X14H5M2ДЛ при аргонодуговой наплавке сплавом X25H10B8. /К.В. Малютин, В.В. Овчинников. // Электromеталлургия. 2018. – №12. – С.10–22.

2. Малютин К.В. Влияние дефектов на долговечность износостойких покрытий, выполненных аргонодуговой наплавкой на сталь ВНЛ-3. / К.В. Малютин, В.В. Овчинников. // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. – Т. 16. – № 9. – С. 391-396.

3. Малютин К.В. Изнашивание образцов стали 08X14H5M2ДЛ после аргонодуговой наплавки сплавом X25H10B8. / К.В. Малютин, В.В. Овчинников. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – (17) – №7. – С.318–324. DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-7-318-324.

4. Малютин К.В. Исследование влияния основных параметров процесса лазерной порошковой наплавки стали 08X14H5M2ДЛ на формирование нанесенных валиков. / К.В. Малютин, В.В. Овчинников. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – (17) – №12. – С.540–546. DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-12-540-546.

Malyutin K.V. Study of the Influence of the Main Parameters of the Laser Powder Cladding Process of 08Kh14N5M2DL Steel on the Formation of Deposited Beads. // K.V. Malyutin, V.V. Ovchinnikov. // Inorganic Materials: Applied Research, 2025, Vol. 16, No. 1, pp. 217–223. DOI: 10.1134/S2075113324701569.

5. Овчинников В.В. Лазерная газопорошковая наплавка со сканированием луча. / В.В. Овчинников, В.В. Порошин, И.А. Зябрев, К.В. Малютин. // Заготовительные производства в машиностроении. 2023. – (21) – №12. – 536–541. DOI: 10.36652/1684-1107-2023-21-12-536-541.

6. Малютин К.В. Износостойкость наплавленного слоя сплавом Х25Н10В8 на стали 08Х14Н5М2ДЛ при повышенных температурах. / К.В. Малютин, В.В. Овчинников. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. – (19) – №12. – С.531–537. DOI: 10.36652/1813-1336-2023-19-12-531-537.

Ovchinnikov V.V. Wear Resistance of 08Kh14N5M2DL Steel Grade Having Deposited Kh25N10V8 Alloy Layer at Elevated Temperatures. / V.V. Ovchinnikov, K.V. Malyutin. // Inorganic Materials: Applied Research, 2024, Vol. 15, No. 4, pp. 1131–1137. DOI: 10.1134/S2075113324700709.