

На правах рукописи

Скоробогатов Андрей Евгеньевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОАКСИАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ**

2.5.5. Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре высокоэффективных технологий обработки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

Научный руководитель:	Тарасова Татьяна Васильевна , кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры высокоэффективных технологий обработки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва
Официальные оппоненты:	Матюнин Вячеслав Михайлович доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии металлов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва Богданов Александр Владимирович кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры МТ-12 «Лазерные технологии в машиностроении» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г. Москва

Защита состоится 03 декабря 2024 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127994, г. Москва, ГСП-4, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте: https://stankin.ru/pages/id_115/page_1492.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.332.01, к.т.н.



Е.С. Сотова

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Перспективы развития машиностроительного комплекса в значительной мере связаны с развитием аддитивного производства, объединяющего технологии изготовления деталей произвольной формы на основе трехмерной CAD-модели без использования формообразующих элементов и большого объема механической обработки. К таким технологиям относятся селективное лазерное плавление (СЛП) и коаксиальная лазерная наплавка.

В последние годы наиболее интенсивно развивается трехмерное формообразование методом коаксиальной лазерной наплавки. Этот метод физико-технической обработки использует энергию лазерного излучения для оплавления присадочного материала и нижележащего слоя с целью формирования на нем наплавленного валика, металлургически связанного с основой. Относительное перемещение лазерного луча и подложки позволяет наносить материал в плоскости по выбранной траектории, а его послойное наложение – создавать трехмерные объекты произвольной формы. Использование метода коаксиальной лазерной наплавки позволяет получать граничные области с хорошей адгезией и покрытия с заданными свойствами.

В настоящее время повышенный интерес исследователей вызывает создание наплавленных покрытий из молибдена (Mo) и его сплавов, что вызвано потребностью производителей в повышении эксплуатационных характеристик биметаллических деталей и покрытий, работающих при высоких температурах. Молибден и его сплавы обладают уникальным сочетанием свойств: высокой температурой плавления, высокой прочностью при повышенных температурах, низким тепловым расширением, высокой тепло- и электропроводностью. В этой связи особенно актуальны исследования создания биметаллических изделий и покрытий из порошков молибдена и его сплавов методами аддитивных технологий (АТ), в частности, коаксиальной лазерной наплавкой. Исследования в этой области показывают, что существует ряд проблем при получении изделий из молибдена указанными методами с высокой плотностью и отсутствием дефектов в виде пор и трещин.

Степень разработанности. С развитием технологий и усложнением конструкций деталей машин и агрегатов, появилась потребность в изготовлении деталей сложной геометрии с неоднородными физико-механическими свойствами для улучшения эксплуатационных характеристик высокотехнологичных изделий. В литературе достаточно полно отражены многие традиционные методы изготовления биметаллических деталей. Значительно реже встречаются методы изготовления биметаллических деталей с использованием аддитивных технологий. Для решения таких задач методами АТ обычно применяют лазерную наплавку. В достаточной степени исследованы процессы наплавки тугоплавких материалов на основе Ti, Ni, и Co. Были попытки наплавки Mo на сталь методами предварительного нанесения порошка, либо коаксиальной наплавки композиционного сплава тугоплавких материалов в состав которых входил Mo. Работ по коаксиальной лазерной наплавке «чистого» порошка Mo на сталь в литературе практически не встречается, данное направление изучено недостаточно, отмечается, что затруднительно получить покрытия из молибдена и его сплавов толщиной более 2 мм без дефектов в виде пор и трещин. Следует отметить, что отсутствуют исследования коаксиальной лазерной наплавки порошков Mo отечественного производства.

В настоящее время исследования в области коаксиальной лазерной наплавки таких пар материалов, как молибден-низкоуглеродистая сталь все еще находятся в стадии разработки и не готовы к широкому практическому использованию.

Цель работы: исследование и разработка комбинированной технологии изготовления биметаллических корпусных деталей, включающей коаксиальную лазерную наплавку функционального слоя из металлических порошков на литые заготовки из конструкционных сталей, для повышения их работоспособности.

Задачи исследования:

1. На основе анализа научно-технической информации в области изготовления биметаллических изделий с использованием традиционных и лазерных аддитивных технологий, а также потребностей машиностроительных предприятий, провести выбор перспективных материалов и технологических подходов к изготовлению биметаллических деталей, сочетающих в себе комплекс различных эксплуатационных свойств.

2. Выполнить аналитические и экспериментальные исследования влияния параметров коаксиальной лазерной наплавки на структуру и фазовый состав функционального слоя из порошка молибдена, наплавленного на литую конструкционную углеродистую сталь.

3. Определить рациональные режимы коаксиальной лазерной наплавки функционального слоя из порошка молибдена на литую конструкционную углеродистую сталь.

4. Провести сравнительные испытания твердости и износостойкости в условиях различных механизмов изнашивания функциональных слоев из молибдена, полученных лазерной наплавкой и традиционной пайкой.

5. Разработать математическую модель распределения температуры нагрева деталей, изготовленных традиционным и разработанным комбинированным методами, в условиях высокотемпературного внешнего воздействия, позволяющую прогнозировать работоспособность деталей.

6. С использованием традиционной технологии пайки и разработанной технологии коаксиальной лазерной наплавки функционального слоя из порошка молибдена на литые заготовки из углеродистых сталей, изготовить экспериментальные образцы биметаллических корпусных деталей и провести их стендовые испытания при высокотемпературном воздействии.

7. Провести сравнительную оценку трудоемкости и стоимости изготовления биметаллической корпусной детали с использованием традиционной технологии пайки и разработанной технологии коаксиальной лазерной наплавки функционального слоя из порошка молибдена на литые заготовки из углеродистых сталей.

8. Разработать рекомендации для изготовления биметаллических корпусных деталей комбинированной технологией, включающей коаксиальную лазерную наплавку функционального слоя из металлических порошков на литые заготовки из конструкционных сталей.

Научная новизна:

1. Разработана и реализована комбинированная технология изготовления биметаллических корпусных деталей, включающая коаксиальную лазерную наплавку металлического порошка молибдена на литую углеродистую сталь, позволившая повысить стойкость функционального слоя при высокотемпературном воздействии.

2. Установлены взаимосвязи между параметрами коаксиальной лазерной наплавки (мощностью лазерного излучения P , расходом порошка $F_{\text{пор}}$, скоростью

сканирования лазерного луча V) отечественного порошка молибдена на углеродистую сталь и характеристиками наплавленного функционального слоя (структурой, фазовым составом и физико-механическими свойствами).

3. Предложена математическая модель распределения температуры нагрева детали «Корпус» в условиях высокотемпературного воздействия, позволяющая прогнозировать работоспособность деталей, изготовленных традиционной технологией и разработанной комбинированной технологией с использованием коаксиальной лазерной наплавки.

Теоретическая значимость работы:

- установленные закономерности влияния параметров коаксиальной лазерной наплавки на структуру и физико-механические свойства образцов из сплавов системы молибден-углеродистая сталь расширяют возможности управления структурой и свойствами биметаллических материалов;

- предложенный в работе комбинированный метод изготовления биметаллических деталей, включающий коаксиальную лазерную наплавку металлического порошка молибдена на литую углеродистую сталь, развивает теорию управления процессами машиностроительного производства и дополняет теоретическую базу для разработки концепции повышения конкурентоспособности машиностроительного комплекса РФ на мировом рынке.

Практическая значимость работы заключается в:

- установленных рациональных режимах лазерной наплавки молибденового порошка на литую углеродистую сталь, обеспечивающих повышение стойкости функционального слоя в условиях различных механизмов изнашивания;

- разработке комбинированной технологии изготовления биметаллических корпусных деталей, включающей коаксиальную лазерную наплавку металлического порошка молибдена на литую углеродистую сталь, позволяющей заменить традиционную технологию пайки и повысить стойкость функционального слоя деталей при высокотемпературном воздействии;

- внедрении технологического процесса изготовления биметаллической детали «Корпус» с применением коаксиальной лазерной наплавки отечественного молибденового порошка ПМС-М99,9 на сталь 25Л, обеспечившего по сравнению с традиционной технологией пайки снижение временных и материальных затрат при производстве деталей.

Методология и методы исследования. Поставленные в работе задачи решались методами аналитических и экспериментальных исследований с применением методов математического анализа и моделирования.

На защиту выносятся:

- комбинированная технология и рациональные режимы изготовления биметаллических корпусных деталей с использованием коаксиальной лазерной наплавки металлического порошка молибдена на литую углеродистую сталь, позволяющие повысить стойкость функционального слоя при высокотемпературном воздействии;

- взаимосвязи между параметрами коаксиальной лазерной наплавки отечественного порошка молибдена на углеродистую сталь и характеристиками (структурой, фазовым составом и физико-механическими свойствами) наплавленного функционального слоя;

- математическая модель распределения температуры нагрева деталей в условиях высокотемпературного воздействия, изготовленных по традиционной технологии

пайки и разработанной комбинированной технологии, позволяющая прогнозировать работоспособность деталей;

- разработанные рекомендации для изготовления биметаллических деталей комбинированной технологией с использованием коаксиальной лазерной наплавки функционального слоя на литую заготовку.

Степень достоверности и апробация результатов. Степень достоверности экспериментальных данных, выводов и рекомендаций подтверждается использованием современных стандартных методик с применением аттестованных приборов и контрольно-измерительной аппаратуры.

Предложенные технологические решения прошли апробацию на АО «МКБ «Факел» (г. Химки). Разработан комбинированный технологический процесс изготовления биметаллической детали «Корпус», заключающийся в нанесении на стальной литой корпус сложной формы защитного молибденового покрытия методом коаксиальной лазерной наплавки, с использованием оборудования и металлических порошков отечественных производителей. Результаты комплексного исследования и преимущества предложенной технологии подтверждены актом внедрения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение научных исследований в рамках государственного задания (проект № FSFS-2021-0003).

По теме диссертации опубликовано 5 работ, в том числе 4 работы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, из которых 3 в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus (Q1 и Q2). По результатам работы подана заявка №2024109695 от 10.04.2024г на изобретение (Патент РФ).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 157 страницах машинописного текста, включая 91 рисунок и 29 таблиц, списка литературы из 110 источников отечественных и зарубежных авторов, а также четырех приложений.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи исследования, научная новизна, приведены научные положения, выносимые на защиту, а также показана теоретическая и практическая значимость результатов работы.

В первой главе представлен обзор литературных источников в области коаксиальной лазерной наплавки тугоплавких материалов и нанесении молибденовых покрытий на сталь методами селективного лазерного плавления и коаксиальной лазерной наплавки. Дано описание основных принципов аддитивных технологий и их реализация при изготовлении биметаллических изделий. Представлены возможные схемы и технологические решения получения покрытий из тугоплавких материалов методами селективного лазерного плавления и коаксиальной лазерной наплавки. Показано преимущество применения порошковых материалов перед проволоочной наплавкой при изготовлении биметаллических деталей со сложной геометрией.

В настоящее время идет интенсивное развитие технологий получения отечественных металлических порошков для их применения в аддитивном производстве. Описаны методы получения металлических порошков разной

морфологии. Наиболее распространенным методом, используемым в аддитивном производстве, является метод атомизации – получение порошков сферической формы.

Лазерная наплавка тугоплавких материалов изучена достаточно полно, однако наплавка порошков Мо изучена недостаточно, особенно с точки зрения получения слоев без дефектов в виде пор и трещин. Исследования лазерной наплавки сплавов с добавлением молибдена показали, что данные покрытия менее склонны к образованию трещин и пор в сравнении с тугоплавкими материалами (Мо). Также известно, что покрытия таких сплавов получены с меньшей мощностью лазерного излучения (~до 1000 Вт). Исследования в области наплавки молибденового порошка ($\geq 99,9\%$ Мо) показали, что для получения более качественных слоев необходимо определить оптимальное соотношение между мощностью лазерного излучения (в интервале от 500 до 2000 Вт) и скоростью сканирования (в интервале от 300 до 900 мм/мин). Увеличение мощности лазерного излучения положительных результатов не дает, в наплавленных слоях образуются дефекты в виде газовых пор и трещин. Аналитический обзор литературных источников показал довольно низкую степень разработанности выбранного направления работы и подтвердил актуальность исследования.

Мониторинг проблем, возникающих при изготовлении биметаллических деталей традиционными методами на ряде предприятий, показывает необходимость поиска альтернативных технологий. В частности, в настоящей работе предлагается замена процесса вакуумной пайки (углеродистая сталь – молибден) на процесс коаксиальной лазерной наплавки порошка молибдена.

Во второй главе представлен выбор материалов и оборудования для коаксиальной лазерной наплавки молибденового порошка на литую сталь, а также методики проведения экспериментов и исследований.

Выбор материалов для исследования процессов коаксиальной лазерной наплавки обусловлен целью данной работы – разработке комбинированной технологии изготовления биметаллических корпусных деталей для повышения их работоспособности, т.е. теоретические и экспериментальные исследования направлены в конечном счете на решение конкретных производственных задач.

В качестве порошковых материалов для лазерной наплавки были рассмотрены молибденовые порошки разной формы ПМ-М и ПМС-М99,9 производства ПМХ «Полема» (РФ, г. Тула). Молибденовый порошок марки ПМ-М получен методом механического измельчения. Выбрана фракция порошка от 20 до 63 мкм, форма частиц порошка осколочная. Молибденовый порошок марки ПМС-М99,9 получен методом механического измельчения с последующей плазменной сфероидизацией. Выбрана фракция порошка от 40 до 100 мкм, форма частиц порошка сферическая.

Разработка режимов наплавки одиночных валиков (углеродистая сталь – молибден) проводилась на отечественной установке серии МЛ7 разработки ГК «Лазеры и аппаратура» (РФ, г. Зеленоград). Верификация подобранных режимов наплавки одиночных валиков, первого слоя (сталь-молибден) и отработка режимов наплавки трехмерных объектов выполнялась на установке КЛП 400 разработки МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Наиболее распространенная традиционная технология изготовления биметаллических деталей таких пар материалов, как углеродистая сталь – молибден является вакуумная пайка. Для исследования процесса вакуумной пайки применяли литую углеродистую сталь марки 25Л, пластины марки ВМ1, изготовленные из молибденового порошка методом спекания с последующей прокаткой, в качестве

припоя использовали медную ленту марки М1. Диффузионную вакуумную пайку проводили в вакуумной электропечи сопротивления типа СНВЭ, разработки ВНИИЭТО (РФ, г. Истра).

Для снижения количества опытов и уменьшения диапазона параметров при определении преимущественных режимов коаксиальной лазерной наплавки единичных валиков использовали математическое планирование эксперимента – полный факторный эксперимент. При оптимизации процесса коаксиальной лазерной наплавки рассматривалось влияние факторов, непосредственно определяющих свойства наплавленного слоя – увеличение микротвердости. Влияющие факторы (параметр): мощность лазерного излучения (P , Вт), скорость сканирования (V , мм/мин) и расход порошка ($F_{\text{пор}}$, г/мин). В этом случае число возможных комбинаций из трех факторов на двух уровнях равно $N = n^k = 2^3 = 8$. Для полного факторного эксперимента типа 2^3 (где 3 – число факторов) уравнение регрессии с учетом эффектов взаимодействия можно представить выражением:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (1)$$

$$\text{или } y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{j,i=1 \\ j < i}}^n b_{ji} x_j x_i + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (2)$$

где b_0 – свободный член уравнения регрессии;

b_i – коэффициенты линейного эффекта;

b_{ji} – коэффициенты эффекта парного взаимодействия;

b_{123} – коэффициенты эффекта тройного взаимодействия;

n – число факторов;

x_j и x_i – факторы эксперимента.

Коэффициенты взаимодействия вычисляются по следующим формулам:

$$b_i = \frac{\sum_{k=1}^N x_i Y_{k \text{ эксп}}}{N}, \quad b_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^N x_j x_i Y_{k \text{ эксп}}}{N}, \quad b_{123} = \frac{\sum_{k=1}^N (x_1 x_2 x_3)_i Y_{k \text{ эксп}}}{N} \quad (3)$$

где $Y_{k \text{ эксп}}$ – параметр оптимизации экспериментальный;

N – число опытов;

k – номер опыта.

x_j и x_i – факторы эксперимента.

Определена значимость коэффициентов полученного уравнения регрессии по критерию Стьюдента. Также проверена адекватность модели по критерию Фишера. На основании полученного уравнения регрессии с помощью программного комплекса Mathcad построили технологические карты коаксиальной лазерной наплавки единичных валиков для определения режимов при реализации которых будут получены требуемые значения микротвердости наплавленных валиков.

Гранулометрический анализ выбранных молибденовых порошков марок ПМ-М и ПМС-М99,9 проводился на грануломорфометре ОССНЮ 500 папо (Бельгия). По результатам гранулометрического анализа построены интегральные и дифференциальные (гистограммы) кривые распределения частиц порошков марок ПМС-М99,9 и ПМ-М по размерам.

Микроструктура образцов анализировалась при помощи инвертированного микроскопа Leica DMi8 фирмы LEICA Microsystems (Германия).

Микрорентгеноспектральный анализ проводился при помощи сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 LM фирмы Tescan (Чехия).

Рентгеноструктурный фазовый анализ проводили на рентгеновском аппарате для структурного анализа ALT XTRA фирмы Thermo-Fisher Scientific (Швейцария) методом сканирования с фокусировкой рентгеновских лучей по Бреггу-Брентано.

Химический анализ материалов для детали «Корпус» проводили по стандартной методике на оптико-эмиссионном спектрометре QSG 750 фирмы OBLF (Германия).

Микротвердость образцов наплавки и молибденовой пластины измеряли на универсальном автоматическом микротвердомере Wilson hardness group TUKON 2500 (Германия). Измерения на образцах проводили с нагрузкой 0,01 кг в соответствии с ГОСТ 9450-76.

Определение плотности образцов проводили методом гидростатического взвешивания на весах Mettler Toledo XP504 с точностью до 0,001 г/см³. В качестве рабочей жидкости использовали этиловый спирт. Каждый образец взвешивали по 3 раза.

Исследования износостойкости при фреттинге проводились на машине трения, которая обеспечивает тестирование пар трения при возвратно-поступательном перемещении одного из образцов. Оценка трибологических свойств (коэффициент трения и износостойкость) образцов, изготовленных традиционным методом и комбинированным методом с использованием коаксиальной лазерной наплавки, проводили на машине трения в возвратно-поступательном режиме (частота 20 Гц, нагрузка 5 Н, количество циклов 10⁵). В качестве модельного контакта использовалась схема сфера/плоскость, при этом сферой служил керамический износостойкий шарик диаметром Ø 10,6 мм из Al₂O₃, а плоскостью – образцы, изготовленные двумя методами. Измерение объёма износа и визуальная оценка повреждений проводили с помощью оптического конфокального микроскопа Olympus LEXT OLS 5000 (Япония).

Износостойкость образцов, изготовленных традиционным методом и комбинированным методом с использованием коаксиальной лазерной наплавки, в условиях абразивного изнашивания определяли с помощью прибора Calowear фирмы CSM Instruments (Швейцария). Принцип измерения заключается в формировании сферической выемки (кратера) на испытуемых образцах. Стальной шар радиусом 12,5 мм покрытый абразивной средой вращается на поверхности образца посредством вала двигателя. В качестве абразива использовался алмаз марки RDDM (15 карат), размер зерна от 0 до 1 мкм. Нормальная сила, прикладываемая к образцу при соприкосновении шара, составляет 0,2 Н. Среднее значение оборотов вала 9,9 об/мин. Вращаясь, шар вырабатывает сферическую выемку износа на поверхности образцов. Размер получающейся выемки определялся при помощи оптического микроскопа.

Исследование износостойкости образцов, изготовленных традиционным методом и комбинированным методом с использованием коаксиальной лазерной наплавки, проводили на трибометре Microtest (модель МТ/60/NI) по схеме «сфера-диск» в соответствии со стандартом ASTM G99. Применяли пару трения: образец в виде пластины размером 19x19 мм, толщиной 8 мм и сферическое контртело диаметром 6 мм из керамики (Al₂O₃). Сферическое контртело устанавливается в держатель перпендикулярно к образцам и прижимается к вращающемуся со скоростью 200 об/мин образцу с заданной нагрузкой Р 10 Н, путь трения составлял 94 м. В процессе испытаний непрерывно регистрируется значение силы трения скольжения и

автоматически вычисляется значение коэффициента трения в виде графиков. Величина износа определяется путем измерения соответствующих линейных размеров пары трения до и после испытания.

В третьей главе представлены исследования функциональных покрытий, полученных с применением коаксиальной лазерной наплавки и традиционной технологией (пайки).

По результатам проведенного гранулометрического анализа порошков марок ПМ-М и ПМС-М99,9 построены интегральные и дифференциальные кривые распределения частиц порошка по размерам (рисунок 1).

Установлено, что средний размер частиц порошка марки ПМ-М составляет $d_{\text{сред}} = 53,55$ мкм, а суммарное содержание частиц, не соответствующее размеру основной фракции (от 20 до 63 мкм) составляет 14,65 %.

Установлено, что средний размер частиц порошка марки ПМС-М99,9 составляет $d_{\text{сред}} = 76,79$ мкм, а суммарное содержание частиц, не соответствующих размеру основной фракции (от 40 до 100 мкм) составляет 9,75 %, что полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к металлопорошковым материалам для аддитивной лазерной наплавки.

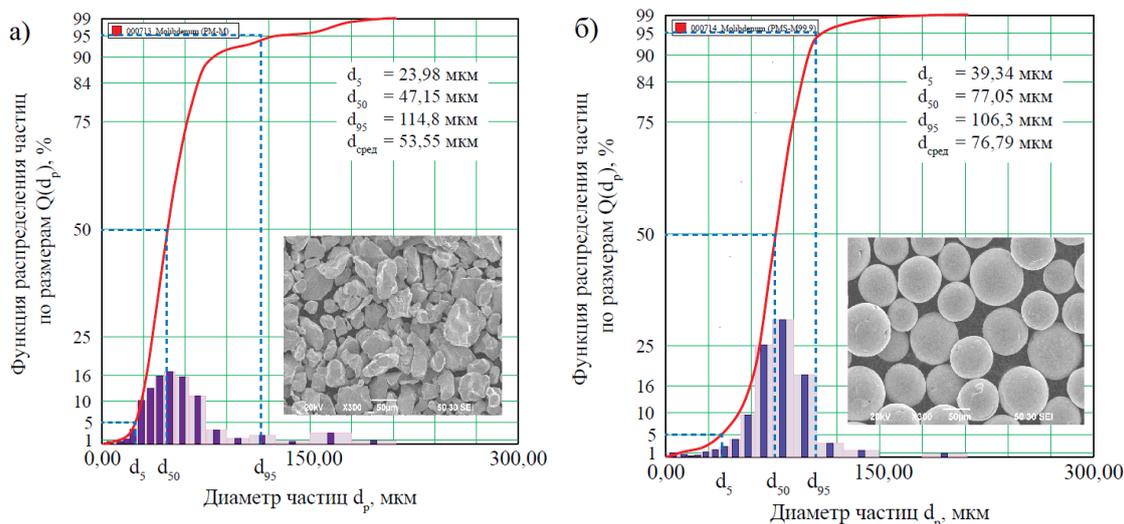


Рисунок 1 – Интегральная кривая и гистограмма распределения частиц по размерам порошка марок: ПМ-М (а), ПМС-М99,9 (б)

Математическое моделирование (регрессионный анализ) позволяет провести теоретический выбор основных параметров процесса коаксиальной лазерной наплавки. Анализ полученного уравнения регрессии показал, что наиболее существенно на микротвердость единичных наплавленных валиков влияет расход порошка и мощность лазерного излучения, менее всего влияет скорость сканирования. С уменьшением мощности лазерного излучения и скорости сканирования предполагается, что микротвердость валиков будет увеличиваться.

Анализ парных коэффициентов уравнения регрессии показал, что при увеличении всех влияющих параметров наплавки микротвердость валиков будет увеличиваться.

На основании полученного уравнения регрессии построили технологические карты (рисунок 2) процесса коаксиальной лазерной наплавки единичных валиков, с помощью которых можно определить значение микротвердости в любой точке факторного пространства.

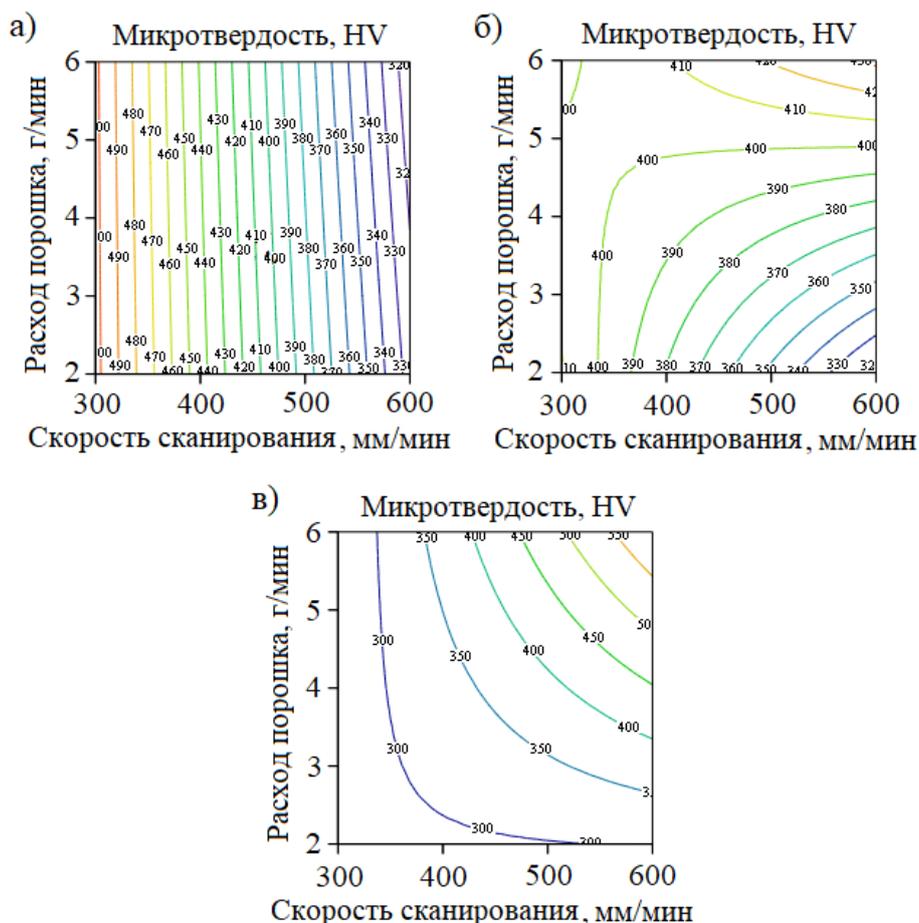


Рисунок 2 – Технологические карты коаксиальной лазерной наплавки единичных валиков при мощности лазерного излучения: 360 Вт (а), 420 Вт (б), 500 Вт (в)

В результате была получена адекватная модель, где все коэффициенты значимы. Необходимо отметить, что при оптимизации параметров (мощность лазерного излучения, скорость сканирования, расход порошка) по разработанной модели требуется учитывать геометрические параметры единичных валиков (глубина проплавления, ширины, высота), а также качество валиков.

На основе полученной модели был проведен параметрический анализ режимов наплавки одиночных валиков молибденового порошка на подложку из стали 25Л с варьируемыми параметрами: мощность лазерного излучения от 360 до 500 Вт, скорость сканирования от 300 до 700 мм/мин и расход порошка от 2 до 6 г/мин при постоянном расходе несущего и защитного газа ($F_{нр}=4$ л/мин, $F_{зг}=10$ л/мин). Наплавку порошка марки ПМС-М99,9 проводили на установке МЛ7, защитная атмосфера – аргон, диаметр пятна лазера 100 мкм.

В наплавленных валиках молибдена при увеличении $\times 1000$ (рисунок 3) наблюдается дендритная структура, столбчатые дендриты растут от границы зоны плавления к центру расплавленной ванны, т.е. в направлении обратном теплоотводу.

Анализ концентрации распределения Mo и Fe (рисунок 4) показывает, что наблюдается взаимная диффузия Mo и Fe по ширине переходного слоя зоны плавления и зоны термического влияния, что дополнительно повышает прочность «сцепления» наплавленного слоя.

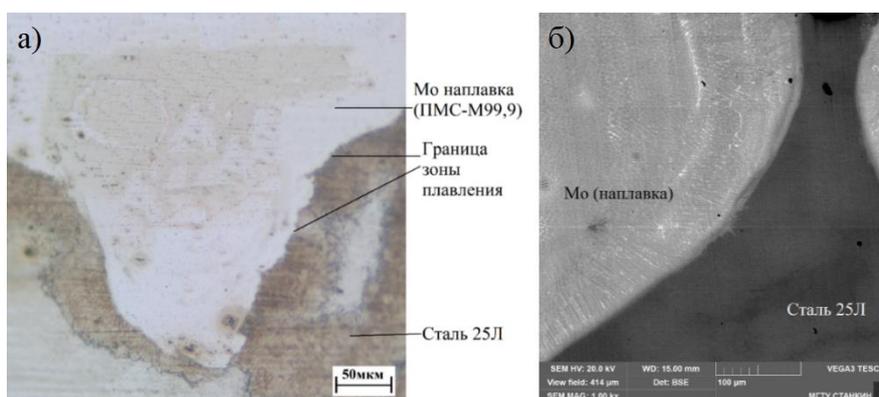


Рисунок 3 – Микроструктура поперечного сечения единичного валика: оптическое изображение $\times 500$ (а), электронное $\times 1000$ (б)

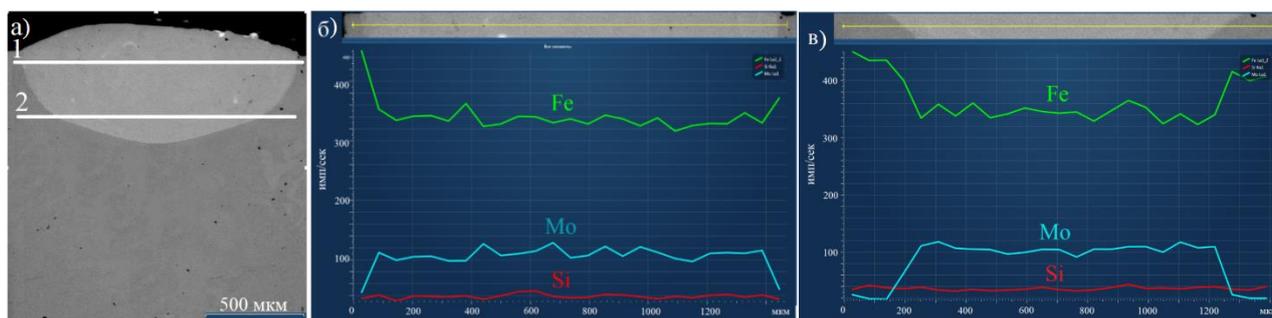


Рисунок 4 – Распределение концентрации основных элементов (Мо-Fe) по сечению валика: электронное изображение (а), линия 1 (б), линия 2 (в)

В результате анализа внешнего вида, микроструктуры поперечного сечения полученных единичных треков и их геометрических характеристик, определены рациональные режимы наплавки одиночных валиков порошка ПМС-М99,9: мощность лазерного излучения $P = 500$ Вт, скорость сканирования $V = 400$ мм/мин, расход порошка $F_{\text{пор}} = 4$ г/мин, расход несущего газа $F_{\text{нг}} = 4$ л/мин и защитного газа $F_{\text{зг}} = 10$ л/мин. Определить рациональные режимы наплавки одиночных валиков порошка ПМ-М без дефектов в виде пор и трещин не удалось.

С целью получения качественного единичного слоя наплавки была проведена наплавка валиков порошка ПМС-М99,9 с разным шагом наплавки (расстояние между осями двух соседних валиков). Шаг наплавки варьировали в пределах от 0,7 до 2,0 мм, мощность лазерного излучения, скорость сканирования, расход порошка, расход несущего и защитного газа постоянные ($P = 500$ Вт, $V = 400$ мм/мин, $F_{\text{пор}} = 4$ г/мин, $F_{\text{нг}} = 4$ л/мин и $F_{\text{зг}} = 10$ л/мин). При шаге наплавки 1,0 мм удалось получить равномерный бездефектный слой.

При наплавке трехмерных объектов, с целью получения более качественных слоев (устранения возможных дефектов в виде пор и трещин), изменяли значения мощности лазерного излучения в процессе наплавки порошка ПМС-М99,9, мощность лазерного излучения первого слоя составила 500 Вт, для второго 900 Вт, для последующих слоев 1000 Вт. Скорость сканирования варьировали в диапазоне от 300 до 400 мм/мин, расход порошка от 4 до 6 г/мин, расход несущего и защитного газа постоянные ($F_{\text{нг}} = 4$ л/мин, $F_{\text{зг}} = 10$ л/мин). Шаг наплавки составлял 1 мм, перемещение сопла по вертикальной оси при лазерной наплавке $\Delta z \approx 0,25$ мм. Для уменьшения анизотропии свойств изменяли направления наплавки на 90° от слоя к слою.

Таким образом, определен рациональный режим наплавки порошка ПМС-М99,9 на литую сталь 25Л: мощность лазерного излучения первого слоя $P = 500$ Вт, для второго слоя $P = 900$ Вт, для последующих слоев $P = 1000$ Вт, скорость сканирования $V = 400$ мм/мин, расход порошка $F_{\text{пор}} = 4$ г/мин, расход несущего газа $F_{\text{нг}} = 4$ л/мин и защитного газа $F_{\text{зг}} = 10$ л/мин, шаг наплавки 1 мм, $\Delta z \approx 0,25$ мм. Исследование микроструктуры и пористости полученных образцов по данным режимам показало отсутствие дефектов в виде пор и трещин.

С целью сравнения свойств традиционного и разрабатываемого комбинированного процесса изготовления биметаллических изделий были изготовлены образцы методом вакуумной диффузионной пайки.

При традиционном способе изготовления используется вакуумная диффузионная пайка с применением припоя – медь марки М1. Недостатком применения меди марки М1 в качестве припоя является возникновение в соединениях дефектов в виде: газовых пор и трещин при пайке в окислительной среде, вследствие образования эвтектики $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$. В данном случае для предотвращения дефектов пайку проводили в вакууме, при давлении не более 10^{-4} мм.рт.ст. Режим пайки: нагрев до температуры $T = 1120$ °С и выдержка в течении 10 мин, охлаждение вместе с печью до комнатной температуры.

Микроструктура паяного шва состоит из смеси твердых растворов на основе меди (ϵ -фаза) и феррита (твердый раствор углерода в α -железе) (рисунок 5). На границе паяного соединения и молибденовой накладки видна четкая темная линия (не по всей длине).

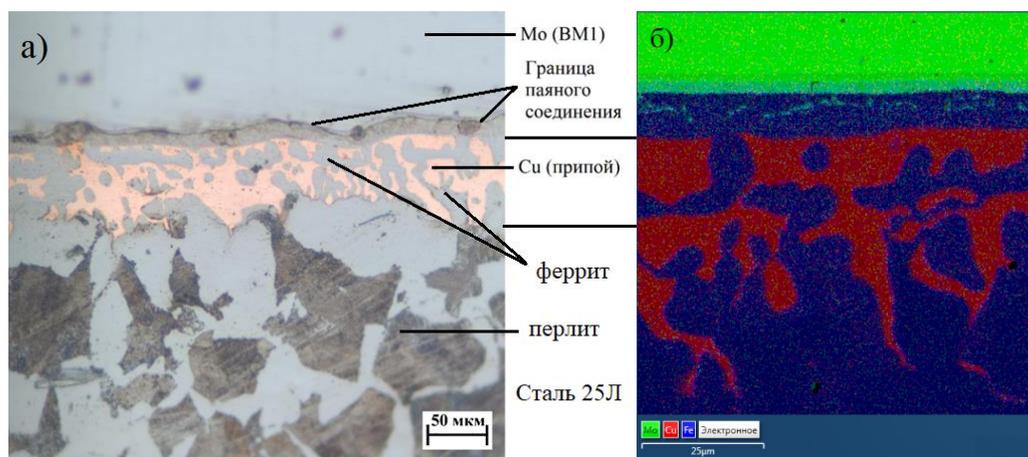


Рисунок 5 – Микроструктура шва при вакуумной пайке: оптическое изображение $\times 500$ (а), многослойное изображение основных элементов Mo, Fe, Cu, $\times 5000$ (б)

Анализ микроструктуры и карт распределения элементов показывает, что паяный шов имеет достаточно большую ширину (до 65 мкм), в котором присутствуют крупные участки меди соизмеримые по величине с зернами феррита и перлита в стальной подложке. Это приведет к разрушению покрытия в процессе эксплуатации вследствие того, что рабочая температура детали превысит температуру плавления медного припоя (1083 °С). Этот недостаток традиционной технологии (пайки) устраняется с помощью лазерной наплавки. Прежде всего, при лазерной наплавке исключается использование дополнительных материалов (припоя) для обеспечения прочного соединения Мо и стали.

При исследовании микроструктуры образца, изготовленного с помощью лазерной наплавки, установлено, что при распределении молибдена и железа в приграничных областях наплавленного слоя нет резких переходов. Концентрация Мо

плавно снижается при переходе к подложке из стали 25Л. Происходит взаимная диффузия железа, углерода и молибдена (рисунок 6 и 7), что обеспечивает хорошую адгезию наплавленного слоя к подложке.

Анализ микроструктуры наплавленных слоев показал, что в результате наплавки порошка ПМС-М99,9 на сталь 25Л можно добиться качественного слоя с отсутствием пор и трещин. Это объясняется не только установлением рациональных параметров обработки, но и присутствием углерода в наплавленном слое (рисунок 7, в), который способствует формированию при кристаллизации молибдена структуры с отсутствием трещин. Рентгеноструктурный фазовый анализ показал, что наплавленный слой состоит из α -твердого раствора Мо и присутствия незначительного количества карбида молибдена Mo_2C .

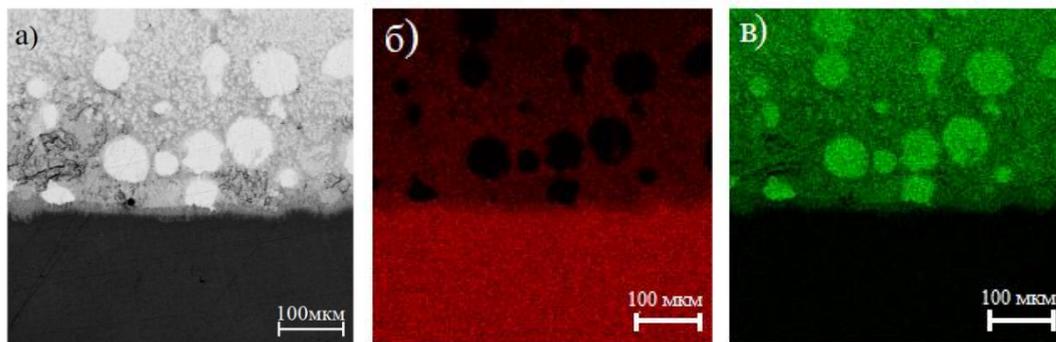


Рисунок 6 – Микроструктура наплавленного слоя Мо на сталь 25Л вблизи границы ванны расплава. Электронное изображение (а), карты распределения Fe (б), Мо (в)

На микроструктурах видны характерные шаровидные включения молибдена разного диаметра, кристаллизующиеся в первую очередь из жидкой фазы, и одноосные дендритные включения. В переходном слое, непосредственно прилегающем к подложке, дендриты кристаллизуются в направлении теплоотвода.

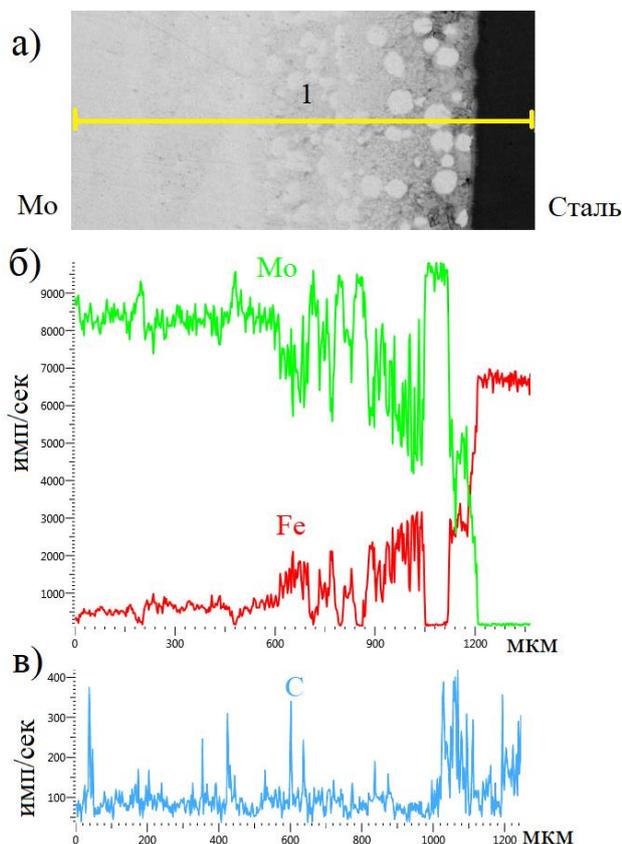


Рисунок 7 – Распределение концентрации основных элементов в наплавленном слое по линии 1 (Мо-сталь). Микроструктура наплавленного слоя, электронное изображение (а), распределение Fe и Мо (б), распределение углерода (в)

Сравнительный анализ твердости молибденовой пластины после пайки и наплавленных молибденовых слоев показал преимущество лазерной наплавки. Твердость молибденового слоя, полученного лазерной наплавкой, значительно выше (таблица 1). Низкая твердость молибденовой пластины на образцах, изготовленных по традиционной технологии, наблюдается в результате отжига молибденовой пластины. В процессе лазерной наплавки реализуется режим закалки из жидкого состояния, что приводит к повышению твердости.

Таблица 1 – Твердость и плотность в зависимости от технологии нанесения Мо

Технология нанесения Мо	Твердость, HV	Плотность, г/см ³
Вакуумная пайка	182 – 192	10,0 – 10,2
Лазерная наплавка ПМС-М99,9	423 – 470	9,8 – 10,0

Сравнительные исследования износостойкости при фреттинге проводились на образцах двух видов, изготовленных по традиционной технологии (пайка) и с помощью лазерной наплавки порошка ПМС-М99,9 по установленным режимам.

Проведя сравнительные исследования износостойкости при фреттинге установлено, что коэффициент трения всех покрытий практически одинаковый и составлял $\sim 0,25$ (рисунок 8).

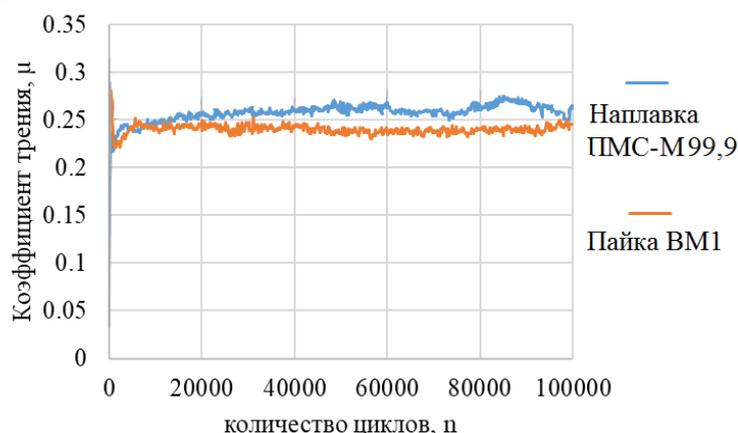


Рисунок 8 – Зависимость коэффициентов трения от количества циклов

Результаты деструктивных процессов в пятне контакта номинально неподвижного фрикционного соединения при изнашивании в условиях фреттинга и объем износа представлены на рисунке 9 и таблице 2.

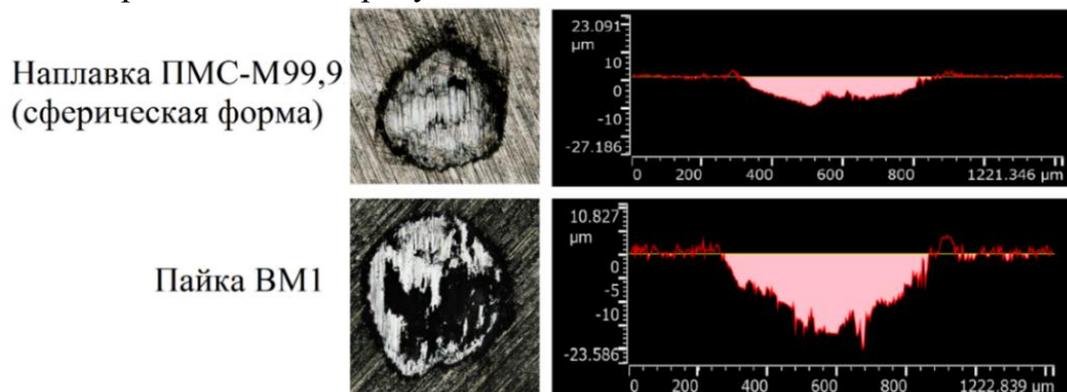


Рисунок 9 – Внешний вид пятна контакта и профилограмма объема износа молибденовых слоев при изнашивании в условиях фреттинга

Таблица 2 – Величина объемного износа молибденовых слоев

Номер испытания	Объем износа молибденовых слоев, мкм ³	
	Наплавка ПМС-М99,9	Пайка ВМ1
1	1218335	2396864
2	1313380	2746736
3	1237625	2495547

Установлено, что на образцах, изготовленных лазерной наплавкой сферического порошка марки ПМС-М99,9, величина объемного износа значительно ниже по сравнению с образцом, полученным пайкой, примерно в 2 раза. Данное явление объясняется меньшей твердостью молибденовой пластины по сравнению с наплавленным молибденовым слоем.

Результаты сравнительных испытаний износостойкости в условиях абразивного износа образцов двух видов, изготовленных по традиционной технологии (пайка) и с помощью лазерной наплавки порошка ПМС-М99,9, приведены на рисунках 10 и 11, а также таблице 3. Из рисунков 10 и 11 видно, что объем износа образца, изготовленного традиционной технологией (пайка ВМ1), выше по сравнению с образцом, изготовленным лазерной наплавкой порошка ПМС-М99,9.

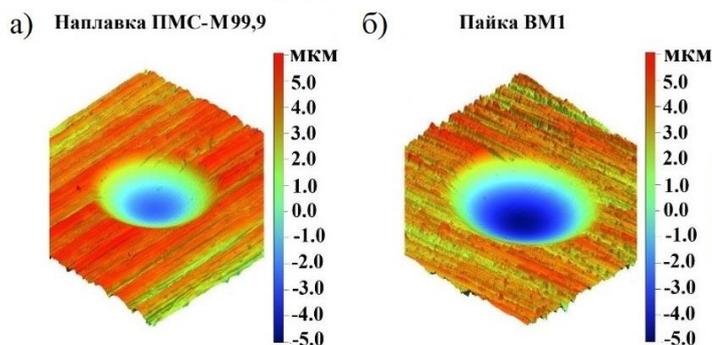


Рисунок 10 – 3Д-профилограммы абразивного износа образцов (t = 15 мин)

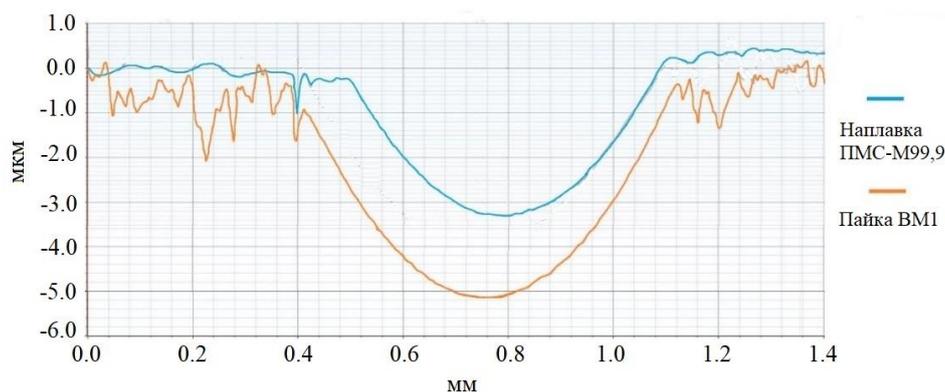


Рисунок 11 – Профилограммы абразивного износа образцов (t = 15 мин)

Таблица 3 – Величина объемного износа молибденовых слоев

Время испытания, мин	Объем износа молибденовых слоев, мм ³	
	Наплавка ПМС-М99,9	Пайка ВМ1
5	0,000759	0,000635
10	0,001116	0,001722
15	0,001249	0,002307

Установлено, что объем износа после 15 мин испытаний наплавленного слоя из порошка ПМС-М99,9 ниже, чем припаянной пластины ВМ1 примерно 1,8 раза.

Исследование износостойкости по схеме «Сфера-диск» проводили на образцах, изготовленных лазерной наплавкой молибденового порошка ПМС-М99,9 по выбранным режимам и образцах, полученных пайкой пластины ВМ1.

Анализ графических зависимостей коэффициентов трения (рисунок 12) показывает, что коэффициент трения у образца наплавки ПМС-М99,9 ниже, чем у припаянной молибденовой пластины ВМ1 ($\sim 0,47$ и $\sim 0,67$ соответственно). Период приработки примерно одинаков у обоих образцов.

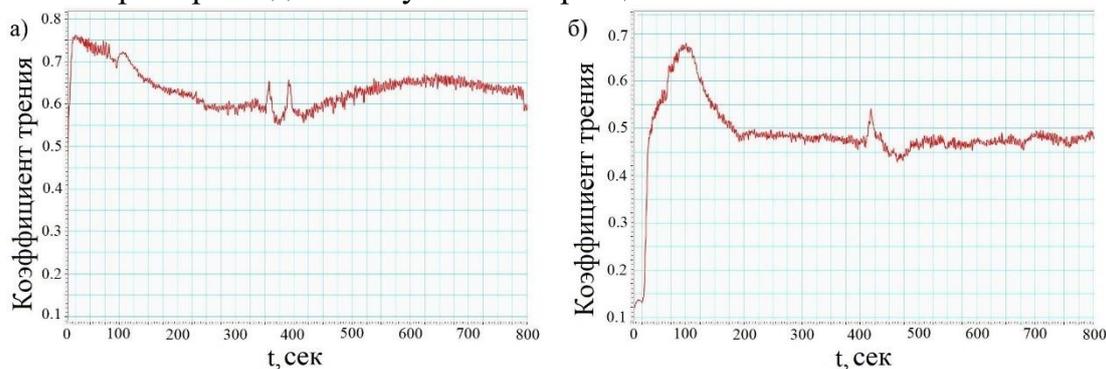


Рисунок 12 – Зависимость коэффициента трения от времени работы: припаянной молибденовой пластины ВМ1 (а), наплавки ПМС-М99,9 (б)

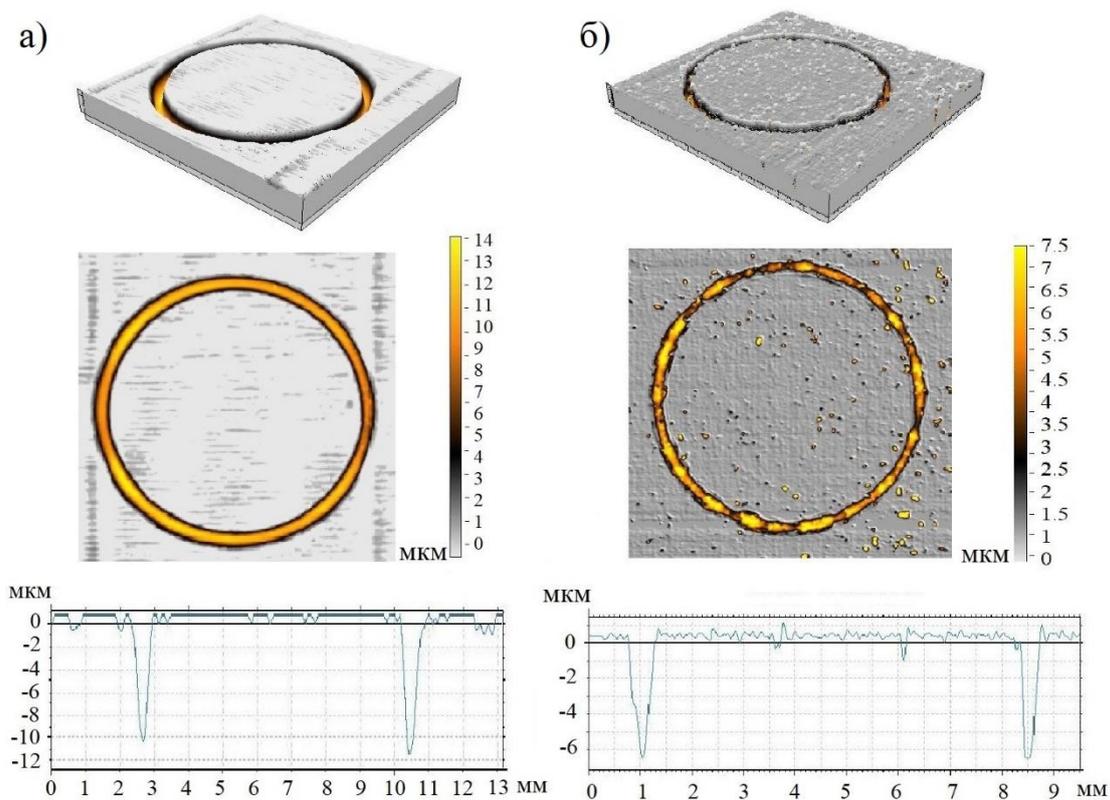


Рисунок 13 – Трехмерные топографии и вид сверху окончательных следов износа, соответствующие припаянной пластине ВМ1 (а) и наплавленного слоя порошка ПМС-М99,9 (б). Глубина износа показана на цветной шкале

На рисунке 13 показана топография поверхности трехмерных дорожек износа для припаянной пластины ВМ1 и наплавленного слоя из порошка ПМС-М99,9. Исходя

из трехмерной топографии поверхности следов износа были оценены объемы износа пластины ВМ1 и наплавленного слоя ПМС-М99,9 ($4,9245 \times 10^{-4}$ мм³/Нм и $3,0529 \times 10^{-4}$ мм³/Нм соответственно).

Исследования показали, что величина износа наплавленного слоя ПМС-М99,9 ниже, чем припаянной пластины ВМ1 примерно в 1,6 раз. Это связано с более мелкодисперсной структурой наплавленного слоя в результате высоких скоростей охлаждения при лазерной наплавке и более высокой твердостью.

Таким образом, защитный молибденовый слой, полученный с помощью лазерной наплавки сферического порошка ПМС-М99,9, позволит обеспечить лучшие эксплуатационные свойства по сравнению с традиционной технологией (пайкой).

В четвертой главе приведены разработанные технологические рекомендации при изготовлении биметаллических деталей (углеродистая сталь – молибден) с применением коаксиальной лазерной наплавки и сравнительный анализ традиционной и предложенной технологии изготовления биметаллической детали «Корпус».

Практическое применение результатов диссертационной работы предполагает замену традиционной технологии производства биметаллических деталей, изготовленных из пары углеродистая сталь – молибден, с помощью пайки на коаксиальную лазерную наплавку молибденового порошка на углеродистую сталь.

Рассмотрим применение предложенной технологии изготовления на конкретном примере. Одной из востребованных промышленностью биметаллических деталей из углеродистой стали и молибдена является деталь «Корпус». Традиционная технология изготовления биметаллической детали «Корпус» – вакуумная диффузионная пайка защитного молибденового покрытия на стальной литой корпус.

Деталь «Корпус» (рисунок 14, а) состоит из корпусной отливки – сталь 25Л (3) и молибденовой пластины ВМ1 (1) припаянной с помощью медного припоя М1 (2). Такая конструкция обусловлена условиями работы детали в два этапа: малоамплитудное трение припаянной пластины о накладку (рисунок 14, в) и кратковременная работа в продуктах сгорания топлива при высоких температурах.

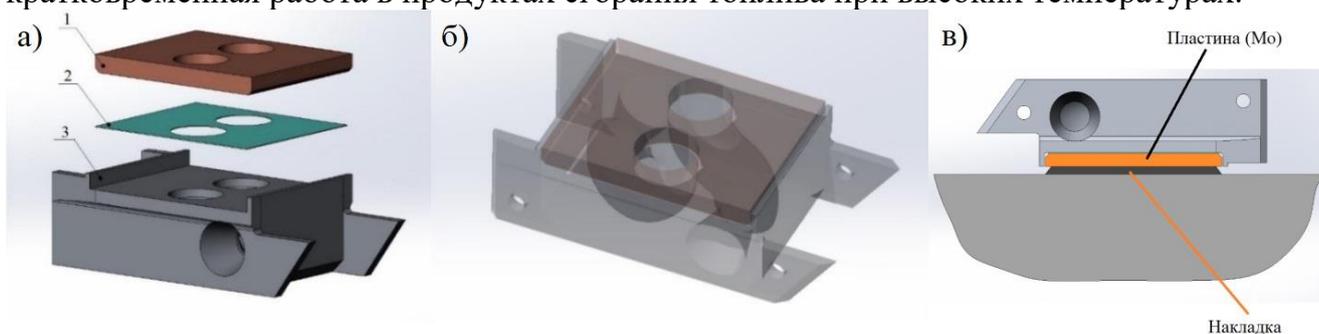


Рисунок 14 – Составные части детали «Корпус» (а), внешний и внутренний контур детали (б), рабочее положение детали (в)

Рабочая температура детали «Корпус» превышает температуру плавления медного припоя М1 (1083 °С), это приводит к разрушению покрытия в процессе эксплуатации, деталь теряет работоспособность через 1,8 с. В связи с этим была рассмотрена альтернативная технология, позволяющая повысить работоспособность детали.

Предложенная технология изготовления детали «Корпус» заключается в нанесении защитного молибденового покрытия с помощью коаксиальной лазерной наплавки на литую заготовку из стали 25Л. Стальной корпус изготавливается

традиционным методом – литье по выплавляемым моделям (ЛВМ). Для лазерной наплавки использовали материалы и оборудование отечественного производства. Процессе наплавки (рисунок 15) осуществляется по следующему режиму: мощность лазерного излучения для первого слоя $P = 500$ Вт, для второго слоя $P = 900$ Вт, для последующих слоев $P = 1000$ Вт, скорость сканирования лазерного излучения $V = 400$ мм/мин, расход порошка $F_{\text{пор}} = 4$ г/мин, расход несущего газа $F_{\text{нг}} = 4$ л/мин и защитного газа $F_{\text{зг}} = 10$ л/мин, шаг наплавки 1 мм, перемещение сопла по вертикальной оси $\Delta z \approx 0,25$ мм. Защитная атмосфера – аргон, диаметр пятна лазера 120 мкм. Расстояние от сопла до подложки 11 мм.

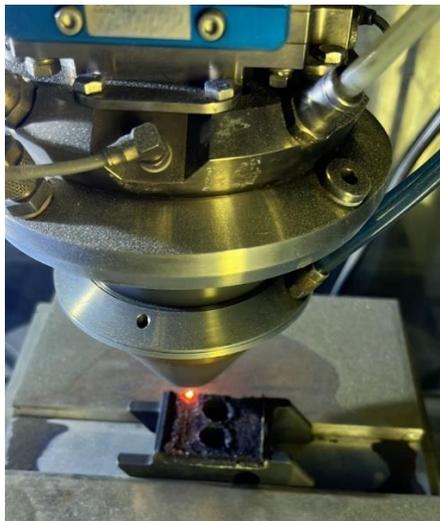


Рисунок 15 – Общий вид процесса наплавки порошка ПМС-М99,9 на литую заготовку детали «Корпус»

Для уменьшения анизотропии свойств производится изменение направления наплавки на 90° от слоя к слою, тем самым реализуется стратегия сканирования (рисунок 16). Сначала наплавляется контур, затем наносятся слои.



Рисунок 16 – Схема наплавки и стратегия сканирования

Для определения максимальных уровней нагрева конструкции детали «Корпус», позволяющих прогнозировать работоспособность деталей, изготовленных по традиционной и разработанной технологиям, было проведено моделирование в программном комплексе Solidworks Flow Simulation. При расчетах учитывались теплофизические характеристики материалов и условия работы детали «Корпус». На рисунке 17 показаны температурные поля детали «Корпус» и протекающих газов по одному из каналов, и температурные поля детали при эксплуатационном режиме работы в момент времени $\tau = 2$ с.

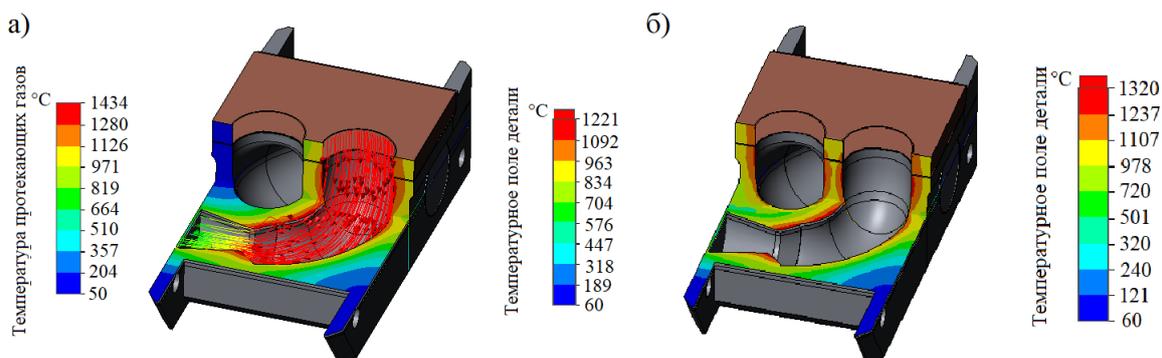


Рисунок 17 – Температурные поля детали и протекающих газов по одному из каналов (а), при эксплуатационном режиме работы (б) в момент времени $\tau = 2\text{ с}$

По результатам моделирования построен график изменения максимальной температуры нагрева элементов детали «Корпус» в зависимости от времени работы (рисунок 18).

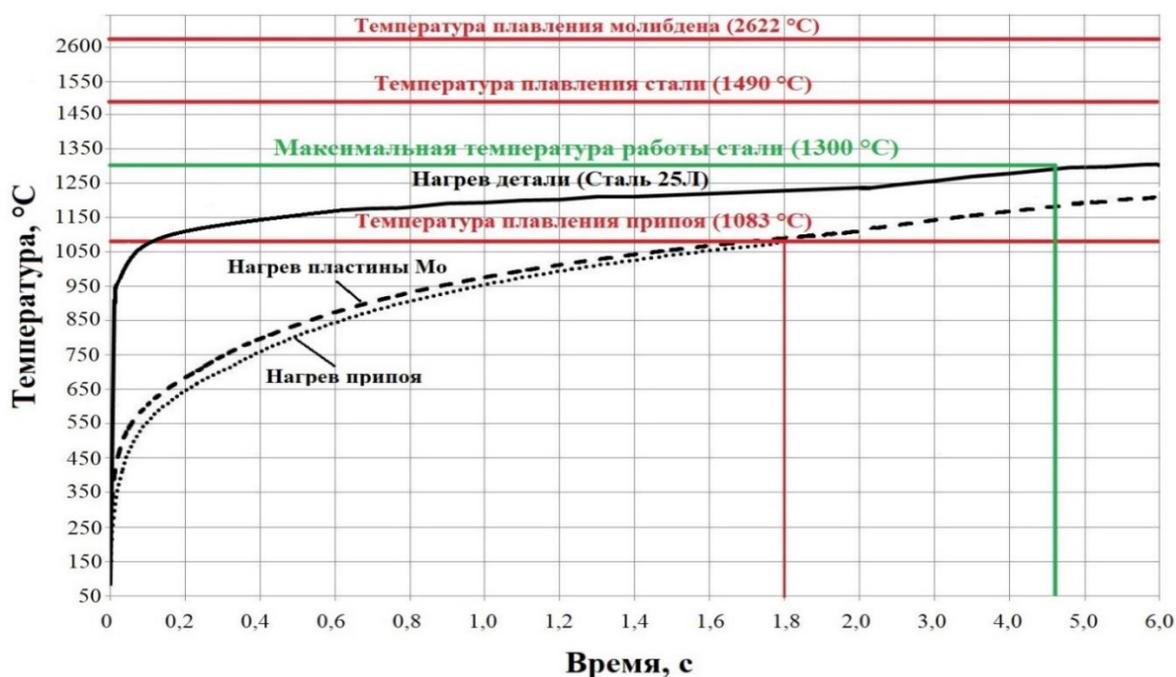


Рисунок 18 – График изменения температуры нагрева элементов детали «Корпус» в зависимости от времени работы

Результаты анализа изменения температурного поля нагрева элементов детали «Корпус» от времени работы показывают, что через 1,8 секунды происходит нагрев выше температуры плавления припоя (1083 °С). Деталь «Корпус» теряет свою работоспособность, т.к. расплавленный припой перестает выполнять свою функцию. При лазерной наплавке работоспособность детали можно увеличить до температуры 1300 °С (максимально возможная температура работоспособности стали 25Л) и время работы до 4,6 секунд.

Таким образом, замена традиционного процесса пайки (с помощью медного припоя) на лазерную наплавку слоя молибдена на углеродистую сталь позволит увеличить работоспособность детали в 2,5 раза без изменения конструкции детали.

Традиционный производственный цикл изготовления биметаллической детали «Корпус» имеет значительно большее количество технологических операций по

сравнению с лазерной наплавкой (рисунок 19 и 20). Предложенная технология изготовления детали «Корпус» исключает следующие технологические операции: изготовление и механическая обработка молибденовой пластины, изготовление медного припоя, подготовка, сборка узла под пайку и вакуумная диффузионная пайка.

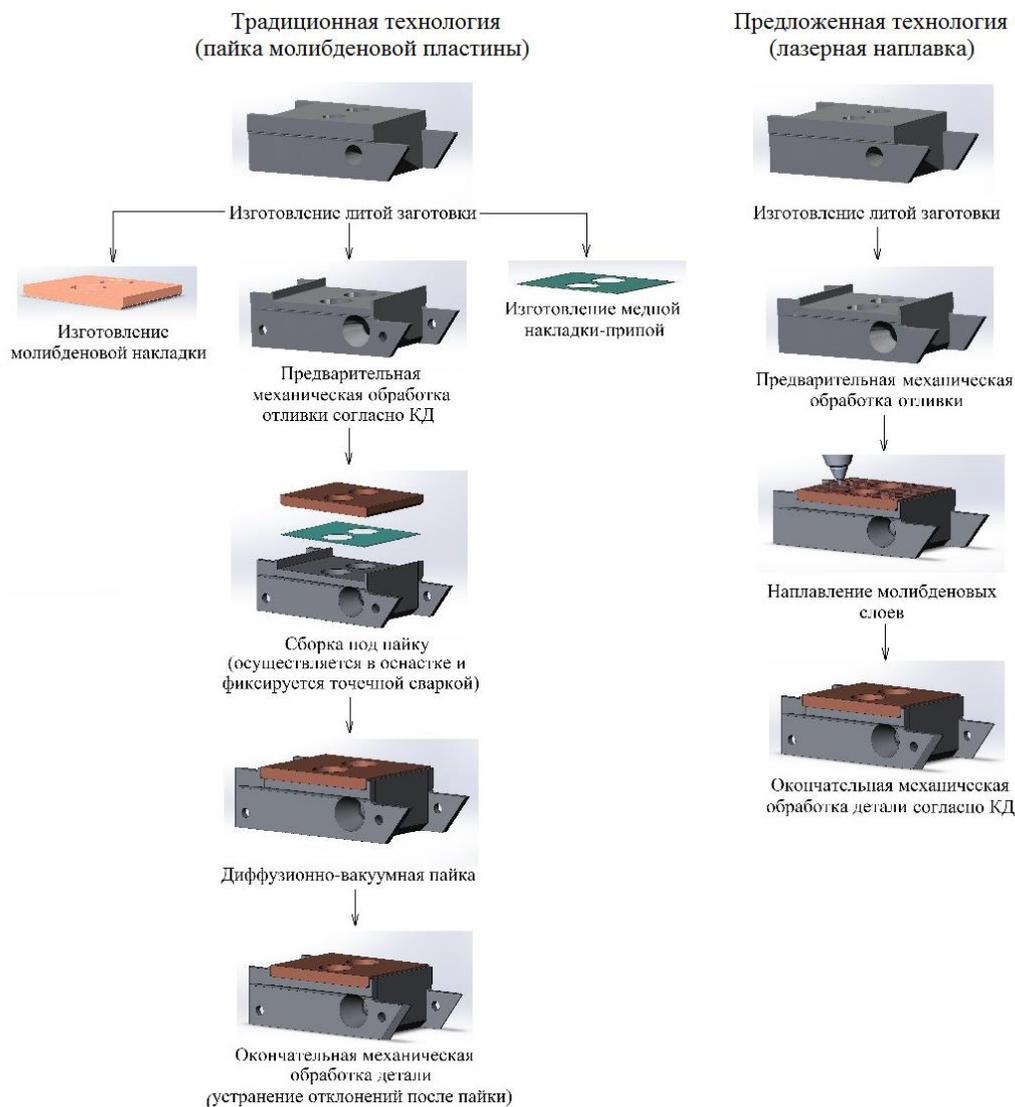


Рисунок 19 – Основные этапы производственного цикла изготовления биметаллической детали «Корпус» по традиционной технологии пайки (слева) и разработанной комбинированной технологии (справа)



Рисунок 20 – Внешний вид литой заготовки (а), заготовки после наплавки (б), готовой детали (в)

Результаты расчета трудоемкости технологических операций при изготовлении детали «Корпус» различными методами на 1 ед. показали, что трудоемкость изготовления детали «Корпус» по традиционной технологии составила 12,39 норм. ч. и предложенной технологии 7,3 норм. ч.

В результате сравнения трудоемкости производственного цикла изготовления детали «Корпус» по традиционной технологии (вакуумной пайки) и с применением лазерной наплавки установлено, что трудоемкость предложенной технологии снижается в 1,7 раза относительно традиционной.

Конкурентоспособность высокотехнологичной продукции складывается из комплекса экономических и тактико-технических характеристик, устанавливающих положение продукции на рынке. Одной из важнейших экономических характеристик является себестоимость изготовления изделий и возможности для ее снижения.

Снижение себестоимости прежде всего достигается за счет повышения производительности труда, совершенствования технологий производства, сокращения затрат на обслуживание и подготовку производства.

Стоимость материалов и оборудования для вакуумной пайки сопоставима со стоимостью материалов и оборудования для наплавки при изготовлении биметаллической детали «Корпус».

На основе результатов расчета стоимости изготовления (1 единицы) детали «Корпус» по двум технологиям в конкретных производственных условиях установлено, что стоимость изготовления по предложенной технологии (21 488,42 руб./шт.) снижается в 1,76 раза по сравнению с традиционной технологией (37 700,56 руб./шт.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертационной работе изложены новые научно обоснованные теоретические и технологические решения и разработки, имеющие важное значение для машиностроения, обеспечивающие повышение работоспособности биметаллических деталей посредством применения комбинированной технологии, включающей коаксиальную лазерную наплавку функционального слоя из металлических порошков на литые заготовки из конструкционных сталей.

2. Выполненный комплекс аналитических и экспериментальных исследований позволил определить влияние параметров коаксиальной лазерной наплавки на структуру и фазовый состав функционального слоя из порошка молибдена, наплавленного на литую конструкционную углеродистую сталь:

- в наплавленном слое наблюдается дендритная структура, столбчатые дендриты растут от границы зоны плавления к центру расплавленной ванны, фазовый состав состоит из α -твердого раствора Мо и незначительного количества карбида молибдена Mo_2C ;

- анализ концентрации распределения элементов по ширине переходного слоя зоны плавления и зоны термического влияния показал наличие взаимной диффузии Мо, Fe и C, что обеспечивает хорошую адгезию наплавленного слоя к подложке.

3. Определены рациональные режимы коаксиальной лазерной наплавки молибденового порошка марки ПМС-М99,9 на литую углеродистую сталь 25Л, позволяющие получать качественные слои без дефектов (отсутствие трещин и пор): мощность лазерного излучения первого слоя $P = 500$ Вт, для второго слоя $P = 900$ Вт, для последующих слоев $P = 1000$ Вт, скорость сканирования $V = 400$ мм/мин, расход порошка $F_{пор} = 4$ г/мин, расход несущего газа $F_{нг} = 4$ л/мин и защитного газа $F_{зг} = 10$ л/мин, шаг наплавки 1,0 мм.

4. Установлено, что лазерная наплавка порошка молибдена ПМС-М99,9 на углеродистую сталь 25Л по рациональным режимам обеспечивает высокую твердость

наплавленного слоя в диапазоне 423–470 НV. Сравнительный анализ твердости молибденовых слоев, полученных наплавкой порошка ПМС-М99,9 и молибденовой пластины после пайки, показал преимущество лазерной наплавки. Твердость молибденового слоя, полученного лазерной наплавкой выше в ~2,4 раза.

5. Проведенный комплекс сравнительных исследований износостойкости функциональных покрытий из молибдена, полученных лазерной наплавкой молибденового порошка ПМС-М99,9 и традиционной пайкой молибденовой пластины ВМ1, позволил выявить характеристики износостойкости в условиях различных механизмов изнашивания:

- в условиях фреттинга коэффициенты трения у обоих покрытий практически одинаковы и составляют ~0,25, но объемный износ образцов с наплавленным молибденовым покрытием в 2 раза ниже в сравнении с покрытиями, изготовленными пайкой;

- в условиях абразивного изнашивания объемный износ наплавленного молибденового покрытия в 1,8 раза ниже, чем припаянной пластины;

- в условиях трения по схеме испытаний «сфера-диск» коэффициент трения у образцов с наплавленным молибденовым покрытием ниже, чем у образцов с припаянной молибденовой пластиной (~0,47 и ~0,67 соответственно), при этом объемный износ образцов с наплавленным молибденовым покрытием в 1,6 раза ниже в сравнении с покрытиями, изготовленными пайкой.

6. Предложена математическая модель распределения температуры нагрева детали «Корпус» в условиях высокотемпературного воздействия для деталей, изготовленных по традиционной (пайка молибденовой пластины) и разработанной (лазерная наплавка молибденового покрытия) технологиям, позволяющая прогнозировать работоспособность деталей. На основе выполненных расчетов с использованием математической модели показано, что при высокотемпературном воздействии время работы детали, изготовленной с применением разработанной комбинированной технологии составляет 4,6 сек, а изготовленной по традиционной технологии 1,8 сек.

7. Проведенные стендовые испытания деталей, изготовленных по разработанной и традиционной технологиям, подтвердили адекватность предложенной математической модели. Установлено, что работоспособность деталей, изготовленных с применением разработанной комбинированной технологии, увеличивается в ~2,5 раза в сравнении с деталями, изготовленными по традиционной технологии.

8. По результатам проведенных расчетов установлено, что разработанная комбинированная технология изготовления биметаллической детали «Корпус» с применением коаксиальной лазерной наплавки снижает трудоемкость изготовления детали в 1,7 раза, а стоимость в 1,76 раза по сравнению с применением традиционной технологии пайки.

9. Разработанные рекомендации по изготовлению биметаллических деталей «Корпус», включающие коаксиальную лазерную наплавку металлического порошка молибдена на литую углеродистую сталь, прошли успешную апробацию на отечественном машиностроительном предприятии по результатам которой получен акт внедрения.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. **Скоробогатов, А.Е.** Возможности изготовления многоматериальных изделий методом лазерной наплавки / **А.Е. Скоробогатов, Т.В. Тарасова** // Материалы

XIV всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ–2021)». – 2021. – С. 287-297.

2. **Скоробогатов, А.Е.** Исследование процессов изготовления многоматериальных изделий с использованием методов аддитивных технологий / **А.Е. Скоробогатов**, Т.В. Тарасова, Р.С. Хмыров // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2022. – N. 1. – С. 104-113.

3. Metel, A.S. Feasibility of Production of Multimaterial Metal Objects by Laser-Directed Energy Deposition / A.S. Metel, T.V. Tarasova, **A.E. Skorobogatov**, P.A. Podrabinnik, Y.A. Melnik, S.N. Grigoriev // Metals. – 2022. – N. 12. – P. 14.

4. Metel, A.S. Quality Diagnostics of Parts Produced by Combined Additive Manufacturing Technology / A.S. Metel, T.V. Tarasova, **A.E. Skorobogatov**, P.A. Podrabinnik, M.A. Volosova, S.N. Grigoriev // Metals. – 2023. – N. 1. – P. 19.

5. Tarasova, T.V. Investigation of the Structure and Properties of Molybdenum Coatings Produced by Laser-Directed Energy Deposition / T.V. Tarasova, M.A. Volosova, **A.E. Skorobogatov**, S.V. Fedorov, P.A. Podrabinnik, A.A. Kholopov, S.N. Grigoriev // Coatings. – 2023. – N. 13. – P. 11.

6. Заявка на изобретение Патента РФ №2024109695 от 10.04.2024г. Способ изготовления биметаллической детали из углеродистой стали и молибдена комбинированным методом / Григорьев С.Н., **Скоробогатов А.Е.**, Тарасова Т.В., Волосова М.А.; заявитель ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».