

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

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**

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
к.т.н., доцент
Тарасова Татьяна Васильевна**

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	13
1.1 Основные аддитивные технологии и их реализация при изготовлении биметаллических изделий.....	13
1.2 Получение функциональных покрытий из тугоплавких материалов методами аддитивного производства.....	21
1.3 Материалы, применяемые для лазерной наплавки	30
1.3.1 Технологии изготовления металлических порошковых материалов для аддитивного производства	31
1.3.2 Производство отечественных металлических порошковых материалов для аддитивного производства	34
1.3.3 Анализ порошковых материалов для аддитивного производства	36
1.4 Традиционные технологии изготовления биметаллических деталей.....	37
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1	40
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	41
2.1 Материалы и оборудование, используемые при коаксиальной лазерной наплавке	41
2.1.1 Выбор материалов для коаксиальной лазерной наплавки.....	41
2.1.2 Оборудование для коаксиальной лазерной наплавки	43
2.2 Материалы и оборудование, используемые при традиционной технологии изготовления биметаллических деталей углеродистая сталь-молибден	47

2.2.1 Материалы, используемые при традиционной технологии изготовления биметаллических деталей.....	48
2.2.2 Оборудование для вакуумной диффузионной пайки.....	49
2.3 Методики проведения экспериментов и исследований.....	51
2.3.1 Математическое планирование эксперимента.....	51
2.3.2 Гранулометрический анализ порошковых материалов	54
2.3.3 Металлографический, микрорентгеноспектральный, рентгеноструктурный и химический анализы	55
2.3.4 Определение механических и физических характеристик.....	56
2.3.5 Методики исследования износостойкости.....	57
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2	61
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОАКСИАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ И ТРАДИЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ (ПАЙКИ).....	62
3.1 Исследование процесса коаксиальной лазерной наплавки молибденового порошка на литую углеродистую сталь	62
3.1.1 Анализ порошковых материалов.....	62
3.1.2 Разработка регрессионной зависимости режимов коаксиальной лазерной наплавки одиночных валиков	65
3.1.3 Разработка режимов лазерной наплавки одиночных валиков	71
3.1.4 Разработка режимов лазерной наплавки единичного слоя.....	78
3.1.5 Разработка режимов лазерной наплавки объемных образцов.....	79
3.2 Изготовление образцов по традиционной технологии с помощью вакуумной диффузионной пайки.....	84
3.3 Исследование структуры и состава слоев, полученных традиционным методом с помощью пайки	85

3.4 Сравнительный анализ механических и эксплуатационных характеристик образцов, полученных с помощью коаксиальной лазерной наплавки и традиционной технологией (пайки).....	87
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3	95
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ «КОРПУС».....	97
4.1 Традиционная технология изготовления биметаллической детали «Корпус».....	98
4.1.1 Изготовление литого стального корпуса.....	99
4.1.2 Механическая обработка составных частей детали «Корпус»	102
4.1.3 Диффузионная вакуумная пайка	104
4.2 Разработка технологических рекомендаций при изготовлении биметаллической детали «Корпус» с применением коаксиальной лазерной наплавки.....	106
4.3 Сравнительный анализ изготовления биметаллической детали «Корпус» по традиционной и предложенной технологиям.....	110
4.3.1 Моделирование максимальных уровней нагрева конструкции детали «Корпус» для прогнозирования работоспособности деталей, изготовленных по традиционной и разработанной технологиям	110
4.3.2 Сравнительный анализ трудоемкости изготовления биметаллической детали «Корпус» по традиционной и предложенной технологиям	118
4.3.3 Сравнительный анализ себестоимости изготовления биметаллической детали «Корпус» по традиционной и предложенной технологиям	120
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения.....	141

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Заявка на изобретение	142
ПРИЛОЖЕНИЕ В Методика моделирования максимальных уровней нагрева конструкции детали «Корпус» в программном комплексе Solidworks Flow Simulation	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Методика и расчет стоимости изготовления биметаллической детали «Корпус» по традиционной и предложенной технологиям	154

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Перспективы развития машиностроительного комплекса в значительной мере связаны с развитием аддитивного производства, объединяющего технологии изготовления деталей произвольной формы на основе трехмерной САД-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 отливки из литой углеродистой стали.

8. Разработать технологические рекомендации для производства биметаллических корпусных деталей по комбинированной технологии, с применением коаксиальной лазерной наплавки функционального защитного слоя из металлических порошков молибдена отливки из литой углеродистой стали.

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 технологического процесса изготовления пространственно-сложной биметаллической детали «Корпус», включающего коаксиальную лазерную наплавку металлического порошка молибдена на литую углеродистую сталь, позволившего заменить традиционную технологию пайки и повысить стойкость функционального слоя детали 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).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, основной части (четырёх глав), заключения, списка литературы и приложений. В первой главе представлен обзор литературных источников в области коаксиальной лазерной наплавки тугоплавких материалов и современного состояния аддитивного производства. Во второй главе описаны материалы и оборудование, применяемые для вакуумной диффузионной пайки и коаксиальной

лазерной наплавки, а также методики проведения экспериментов и исследований. В третьей главе описаны результаты комплекса экспериментальных сравнительных исследований защитных молибденовых покрытий, полученных с помощью традиционной (пайка) и комбинированной (коаксиальная лазерная наплавка) технологией. В четвертой главе представлены разработанные технологические рекомендации по изготовлению биметаллических деталей, включающие коаксиальную лазерную наплавку металлического порошка молибдена на литую углеродистую сталь.

Диссертационная работа изложена на 158 страницах машинописного текста, включая 91 рисунок и 29 таблиц, списка литературы из 110 источников отечественных и зарубежных авторов, а также четырех приложений.

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.5.5. «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»:

п. 2. Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических, химических и комбинированных воздействий;

п. 3. Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

1.1 Основные аддитивные технологии и их реализация при изготовлении биметаллических изделий

Аддитивное производство (АП) – совокупность технологий послойного добавления материала для изготовления трехмерных объектов с использованием 3D-моделей [1, 2].

Существует множество методов изготовления деталей аддитивным способом. С помощью этих технологий, возможно, получать трехмерные объекты практически любой сложности и габаритных размеров из полимеров, керамики, металлов и различных их комбинаций [3].

Несмотря на многообразие методов аддитивных технологий, применяемых для изготовления деталей из различных материалов их объединяет процесс построения – на основании САД-модели.

Процесс создания трехмерных объектов с помощью аддитивных технологий состоит из следующих этапов:

1. Создание (проектирование) САД-модели;
2. Преобразование САД-модели в файл совместимый с оборудованием, как правило STL формата;
3. Загрузка файла на оборудование, подготовка задания для изготовления с помощью программного обеспечения (разбивка файла на слои и определение схем сканирования);
4. Настройка и запуск оборудования (назначение параметров, калибровка, смена материала и т.д.);
5. Процесс изготовления трехмерного объекта;

6. Извлечение, очистка и первичная постобработка детали (очистка от остатков материала, удаление поддержек и т.д.);

7. Последующая обработка (механическая и термическая обработка, нанесение покрытий и т.д.).

Наибольший интерес и развитие получили методы аддитивного производства, основанные на изготовлении изделий из металлических материалов, это связано с широкой возможностью их функционального применения в различных отраслях промышленности [4, 5].

На данный момент существует много способов и технологий послойного получения функциональных биметаллических деталей из металлов и с каждым годом появляются новые, которые относятся к аддитивным технологиям. Все аддитивные технологии можно классифицировать по различным признакам, например, по применяемым материалам, по источникам и методам подвода энергии для создания слоя и др.

Наиболее распространенной является классификация, которая разделяет технологические процессы аддитивного производства на 7 групп по принципу построения изделия [6].

Наиболее перспективными для изготовления биметаллических изделий являются:

- синтез на подложке (powder bed fusion), это процесс аддитивного производства, в котором энергия от внешнего источника используется для избирательного плавления предварительно нанесенного слоя порошкового материала, к данному типу относится селективное лазерное плавление (СЛП);

- прямой подвод энергии и материала (directed energy deposition), это процесс аддитивного производства, в котором энергия от внешнего источника используется для соединения материалов путем их плавления в процессе нанесения, к данному типу относится лазерная наплавка [7].

Селективное лазерное плавление (SLM – Selective Laser Melting) является способом получения деталей послойным лазерным синтезом металлического порошкового материала. Слой формируется равномерно, на платформу

насыпается определенная доза порошка и разравнивается с помощью специальных роликов или рикелей (ножей), образуя ровный слой материала определенной толщины [8]. Затем выборочно, в соответствии с сечением CAD-модели детали, слой порошка сканируют лазером, расплавляя частички порошка. Часть порошка остается в заданном слое не использованным. Таким образом, при перемещении платформы в вертикальном направлении слой за слоем получают деталь. При этом часть порошка остается в заданном слое не использованным. Слои формируются за счет двух емкостей с вертикальным перемещением. Одна из емкостей – это рабочая камера, другая предназначена для хранения и порционной подачи порошка в рабочую камеру. Рабочая камера перемещается на толщину заданного слоя (от 10 до 120 мкм) тем самым формируя слой порошка, а камера хранения поднимается на такую же высоту. Далее плоский нож поперечным движением разравнивает слой и снимает избыток порошка. Нанесенный слой сканируется лазерным излучением в соответствии с заданием. Далее наносится новый слой и так слой за слоем. По завершению построения рабочая камера находится в крайнем нижнем положении, при этом весь порошок из камеры хранения переместился в рабочую камеру. Полученная деталь находится в камере построения со всем объемом неиспользованного порошка. Детали извлекаются из куба, порошок просеивается и повторно используется. Наиболее распространенная схема процесса СЛП представлена на рисунке 1.1.

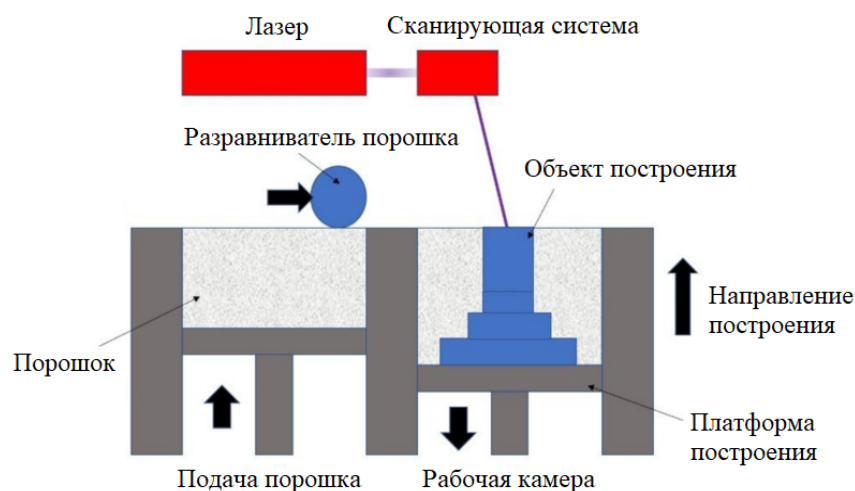


Рисунок 1.1 – Схема процесса селективного лазерного плавания

Основные преимущества данной технологии:

- большой выбор порошковых материалов (на основе алюминия, титана, железа, кобальта, хрома) для изготовления функциональных заготовок;
- возможность применение неметаллических порошковых материалов, например, керамики;
- высокое качество поверхности и высокая геометрическая точность получаемых изделий и минимальный объем постобработки [9, 10];
- изготовление функциональных деталей и возможность изготовления биметаллических деталей;
- широкая область применения данной технологии в различных отраслях промышленности [11, 12].

Основными недостатками данной технологии является использование большого количества порошка, чтобы полностью заполнить рабочую камеру построения. Небольшие габаритные камеры построения, ограниченные лазерно-оптическими модулями, по сравнению с другими технологиями.

История развития аддитивных технологий насчитывает более 30 лет, за рубежом уже существуют серийные предприятия по изготовлению изделий методами АП в различных отраслях промышленности и сферах услуг. Как правило данные предприятия оснащены самым передовым оборудованием фирм-лидеров в области разработки технологий и производства оборудования таких как: 3D-systems (США), EOS (Германия), SLM Solutions (Германия), Renishaw (Англия), Concept Laser (Германия) [13–16].

Последние годы активно идут работы по разработке и производству отечественного оборудования. Также создаются центры компетенций АП на базе институтов и фирм производителей, где обоснованно и необходимо применение аддитивных технологий.

Еще одним перспективным методом аддитивного производства для изготовления биметаллических деталей является лазерная наплавка. В отличие от технологии селективного лазерного плавления материал и энергия подаются непосредственно в место построения изделия, сканирование происходит в

соответствие с текущим сечением заданной CAD-модели детали. Материалом для лазерной наплавки являются металлические порошки или проволока.

Разновидностью лазерной наплавки с применением в качестве материала проволоки, является технология COAXwire (Laser processing optic), разработанная фирмой IWS (Германия). Технология осуществляется с помощью специальной головки, которая устанавливается на роботе-манипуляторе. Особенность головки в формировании трех лазерных лучей, которые фокусируются в одну точку. Лазерный луч от источника расщепляется на три луча и фокусируется в диаметр, равный диаметру использованной проволоки. На рисунке 1.2 представлена реализация данной технологии.

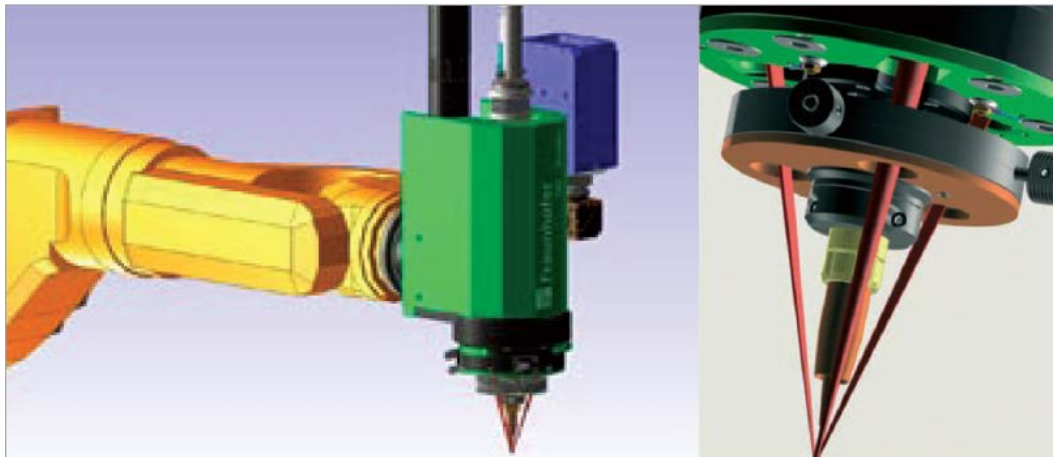


Рисунок 1.2 – Реализация технологии COAXwire [17]

Преимущества данной технологии заключается в том, что у проволоки меньше площади контакта с кислородом в процессе построения по сравнению с порошковым материалом. Наплавленный металл меньше подвергается окислению, как следствие деталь имеет структуру с минимально возможным количеством оксидных включений. Лучший коэффициент использования материала (КИМ до 100%) по сравнению с наплавкой порошка, где часть порошка испаряется или рассеивается мимо места наплавки [18]. Наиболее востребован для наплавки легко окисляемых материалов таких как алюминий и титан.

Недостатки заключаются в сложной конструкции головки и системы точной фокусировки лазерных лучей в одной точке, высокой стоимости лазерного

оборудования, необходимостью использования большого количества дорогостоящих и быстро выводимых из строя оптических элементов.

Разновидностью проволочной наплавки является также технология NTi DMD разработанная фирмой Norsk Titanium AS (Норвегия). Технология нацелена на изготовление изделий путем наращивания проволоки из титановых сплавов. Сначала изготавливается титановая проволока, которая в дальнейшем наращивается с помощью специальной головки с дуговым генератором плазмы [19]. Особенностью технологии является плазма на основе аргона, возникающая под действием дугового разряда между отрицательно заряженным не расходуемым тугоплавким электродом и деталью закрепленной на положительно заряженной платформе. Титановая проволока подается в зону плазмы и расплавляется. Зона расплава защищена от окисления кольцом аргона.

Разновидностью метода прямого осаждения материала является селективное электронно-лучевое плавление. Технология EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing) разработанная фирмой Sciaky (США). В основе технологии лежит применение в качестве энергии тепло электронных пучков, а в качестве применяемого материала металлическая проволока. Процесс осуществляется в вакуумной камере. Подающаяся проволока расплавляется и образует слой. Габариты наплавленных деталей ограничены только габаритами вакуумной камеры, головка установлена на роботе манипуляторе [20]. Технические решения данной технологии позволяют использовать широкий выбор проволоки в качестве материала построения. Схема процесса электронно-лучевого плавления представлена на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Схема технологии электронно-лучевого плавления

Преимущества технологии электронно-лучевого плавления (EBAM) в широком выборе материалов (проволоки) для изготовления деталей. Использование данной технологии в качестве ремонтных работ, вышедших из строя дорогостоящих деталей. Высокое качество слоев достигается за счет процесса плавления в вакуумной среде.

К недостаткам относится высокая стоимость готовых деталей из-за долгого процесса наплавки, в которое входит вакуумирование камеры.

Наиболее распространенным методом аддитивных технологий, для изготовления биметаллических деталей является коаксиальная лазерная наплавка. Технология DMD (Direct Metal Deposition) прямой подвод энергии и материала непосредственно в область наплавки [21]. В качестве материала используют металлические порошки, которые с помощью транспортирующего газа (как правило аргон) подаются в зону наплавки (ванну расплава), в ту же точку подается сфокусированный лазерный луч [22]. Сопло установки имеет сложную конструкцию. По оси сопла подается лазерный луч, по периметру вокруг луча коническим сходящимся факелом подается газопорошковая смесь. Вокруг потока газопорошковой смеси и лазерного луча подается защитный инертный газ [23]. Схема процесса представлена на рисунке 1.4.

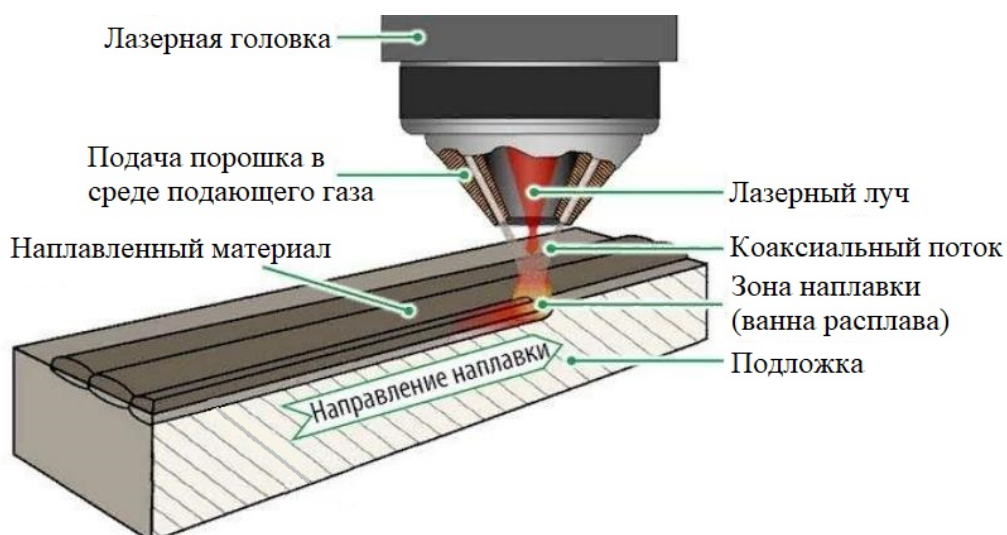


Рисунок 1.4 – Схема процесса коаксиальной лазерной наплавки

Технология LENS (Laser Engineered Net Shaping) – это разновидность коаксиальной лазерной наплавки с основным отличием, заключающимся в обеспечении герметичной камеры построения из которой откачивается воздух и наполняется инертным газом с избыточным давлением [24].

Преимущества данных технологий заключаются в обеспечении стабильности и качества процесса наплавки за счет множества регулируемых параметров. Технология позволяет производить наплавку параллельно двух материалов с различными физико-механическими свойствами, таким образом изготавливать биметаллические детали. К преимуществам можно отнести возможность использования металлических порошковых материалов неправильной (осколочной) формы.

Недостатками процесса являются высокая стоимость применяемых порошковых материалов по сравнению с проволочными материалами, и высокая стоимость применяемых коаксиальных сопел.

Влияние схемы подачи порошкового материала на результат лазерной наплавки, отмечено многими авторами [25–28]. Наиболее распространённая является коаксиальная схема, это связано с тем, что при ее использовании взаимное положение систем (лазерно-оптический модуль и подача порошка) не

зависят от перемещения детали или сфокусированного лазерного пучка, что обеспечивает постоянные условия процесса наплавки [29].

Следует отметить, что проводились исследования процесса формирования струи порошка, в том числе с использованием моделирования процесса [30, 31]. Кроме того, проводили исследования по моделированию процессов наплавки – формирование валика, определение влияния режимов наплавки на размеры валика, сопровождаемые экспериментальными подтверждениями адекватности моделей [32, 33].

Анализ литературных данных в области исследования процессов изготовления многоматериальных и биметаллических изделий различными методами аддитивного производства показывает, что для изготовления биметаллических деталей наиболее целесообразно использование технологии коаксиальной лазерной наплавки.

1.2 Получение функциональных покрытий из тугоплавких материалов методами аддитивного производства

В настоящее время исследователями различных международных групп ведутся активные разработки и исследования технологий с помощью, которых возможно получать покрытия из тугоплавких материалов методами АП с целью улучшения эксплуатационных характеристик изделий.

В последнее 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 из сплавов на основе молибдена. 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, направленные на создание биметаллических изделий и покрытий из порошков молибдена, и его сплавов методами аддитивных технологий, таких как селективное лазерное плавление и коаксиальная лазерная наплавка. Исследования в этой области показывают, что существует ряд проблем при получении изделий из молибдена с высокой плотностью и отсутствием дефектов в виде пор и трещин.

Авторы работы [34] наплавляли молибденовый порошок (Mo 99%) мелкой фракции методом предварительного нанесения слоя, при следующих режимах наплавки: скорость сканирования 0,8 см/с, мощность лазерного излучения 2000 Вт. Расчетным путем установлено, что 51% поглощаемой мощности расходуется на испарение порошка. Получена однородная структура наплавленного молибденового слоя (рисунок 1.5, а), что по мнению авторов должно положительно влиять на обеспечение высоких эксплуатационных свойств покрытий.

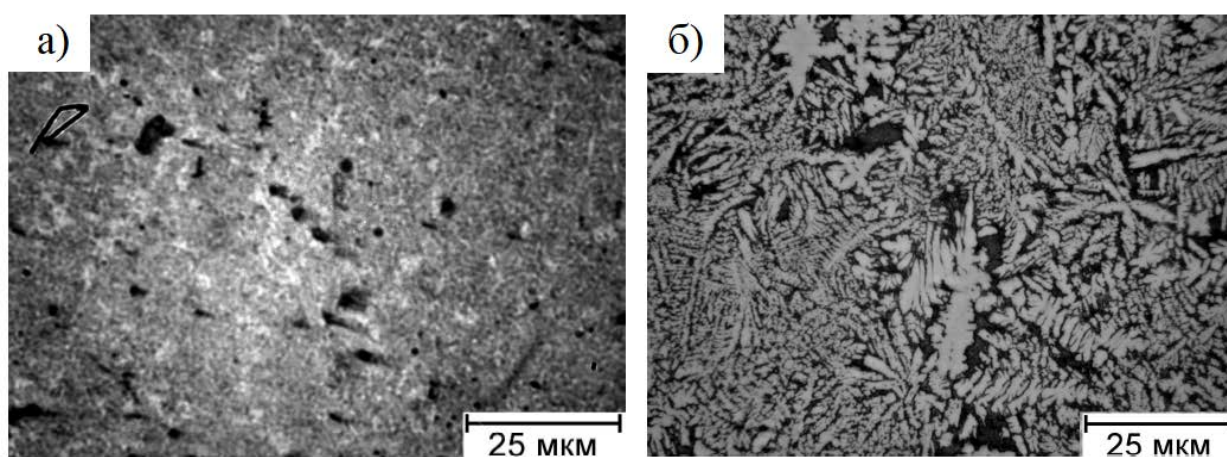


Рисунок 1.5 – Микроструктура наплавленных слоев молибдена (а), вольфрама (б)

В работе [35] показана наплавка молибденового порошка ($> 99,9\%$ Mo) с размером частиц от 75 до 150 мкм на подложки из молибдена и нержавеющей стали, мощность лазерного излучения варьировали от 2500 до 9000 Вт, скорость сканирования от 254 до 635 мм/мин, при постоянной подаче порошка 19 г/мин, шаг наплавки составлял 2 мм. При мощности лазерного излучения от 2500 Вт до

4000 Вт не удалось получить молибденовый слой из-за низкой адгезии частиц порошка к подложке из молибдена. При увеличении мощности до 6150 Вт в наплавленных слоях были выявлены дефекты в виде пор и трещин. Предварительный нагрев молибденовой подложки от плюс 120 до плюс 150 °С не приводил к улучшению структуры наплавленных слоев.

Использование подложки из нержавеющей стали привело к меньшему количеству дефектов в виде пор и трещин. На микроструктуре (рисунок 1.6, а) показана наплавка молибденового порошка на подложку из нержавеющей стали. При мощности лазерного излучения 4500 Вт и скорости сканирования 510 мм/мин наблюдаются дефекты в виде пор. При применении более низких мощностей лазерного излучения, установлено неполное сплавление частиц порошка. Увеличение мощности до 7000 Вт и 9000 Вт при скорости сканирования 325 мм/мин получали слои, которые отрывались от подложки. На микроструктуре поперечных сечений слоев (рисунок 1.6, б и в) видно, что слои имеют хорошую адгезию с подложкой, но в них присутствуют трещины по границам зерен и пористость.



Рисунок 1.6 – Микроструктура поперечного сечения слоев, полученных при мощности лазерного излучения и скорости сканирования: 4500 Вт и 510 мм/мин (а), 7000 Вт и 635 мм/мин (б), 9000 Вт 635 мм/мин (в)

В работе [36] наплавляли молибденовый порошок (99,92% Мо) со средним размером частиц порошка 37 мкм, при мощности лазерного излучения 800 Вт, с шагом наплавки 1 мм, с варьируемыми значениями скорости сканирования от 300 до 900 мм/мин. Уменьшение скорости сканирования лазерного луча означает

увеличение плотности энергии, определяемой как энергия, подводимая к единице площади. В наплавленных слоях с относительно высокой скоростью сканирования наблюдались поры (рисунок 1.7, а и б), по мере уменьшения скорости сканирования поры увеличивались, однако при скорости сканирования 600 мм/мин получена структура без дефектов (рисунок 1.7, в).

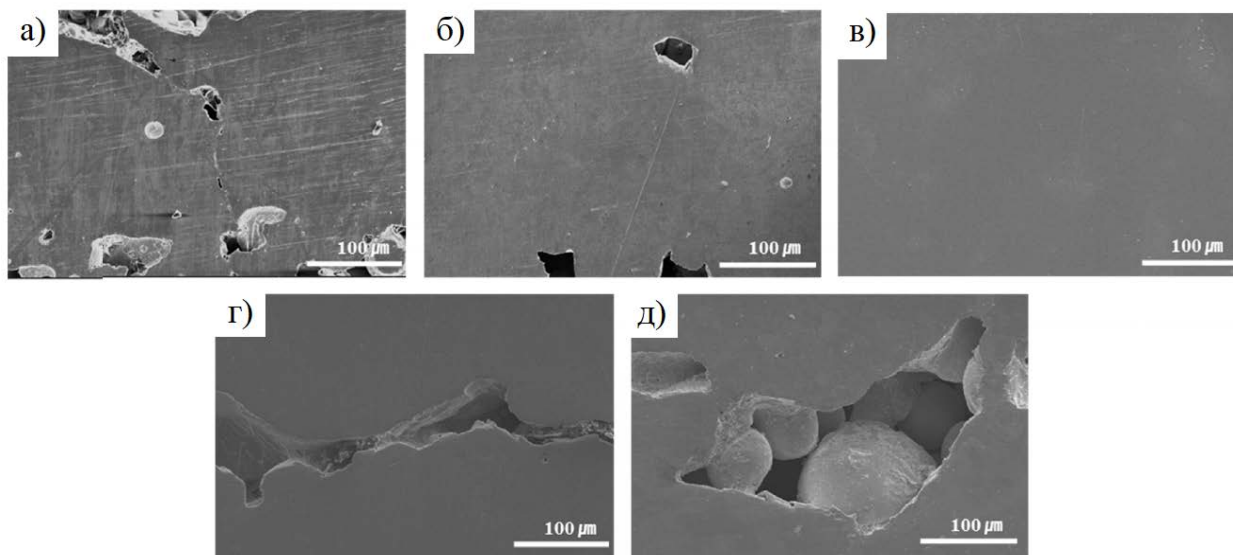


Рисунок 1.7 – Электронное изображение поперечного сечения слоя Мо, нанесенного при различных скоростях сканирования: 900 мм/мин (а), 750 мм/мин (б), 600 мм/мин (в), 450 мм/мин (г), 300 мм/мин (д)

Молибденовый слой, нанесенный при скорости сканирования 600 мм/мин (плотности энергии $533,3 \text{ Дж/мм}^3$) имел значение твердости 324 HV с пористостью 2%.

Кроме того, многие ученые обнаружили, что параметры процесса лазерной наплавки имеют важное влияние на характеристики наносимых покрытий [37–39].

Проводили наплавку на стальную подложку композиционного порошка T15M при различной скорости сканирования. Результаты показали, что покрытие, полученное при скорости сканирования 200 мм/мин, обладало лучшей износостойкостью [40].

Покрытия из высоко энтропийного сплава (ВЭС) ((CoCrFeNi)₉₅Nb₅)_{100-x}Mo_x (x = 1, 1,5 и 2) были нанесены на подложку из стали методом коаксиальной

лазерной наплавки [41]. Исследовано влияние мощности лазерного излучения и содержания элементов молибдена на микроструктуру и микротвердость покрытий. Полученное покрытие состоит из ячеистых и столбчатых дендритных структур. С увеличением содержания молибдена столбчатые дендритные структуры исчезают, зерна измельчаются, расположение зерен становится более компактным.

Объемная доля междендритной фазы при мощности лазерного излучения 800 Вт (рисунок 1.8, а) была небольшой и неравномерной. После увеличения мощности лазерного излучения до 1000 Вт (рисунок 1.8, б) увеличилась объемная доля междендритной фазы. При мощности лазерного излучения 1200 Вт (рисунок 1.8, в) объемная доля междендритной фазы снова уменьшилась. Таким образом, покрытия, полученные при мощности 1000 Вт, имели большую объемную долю междендритной фазы и более высокую микротвердость.

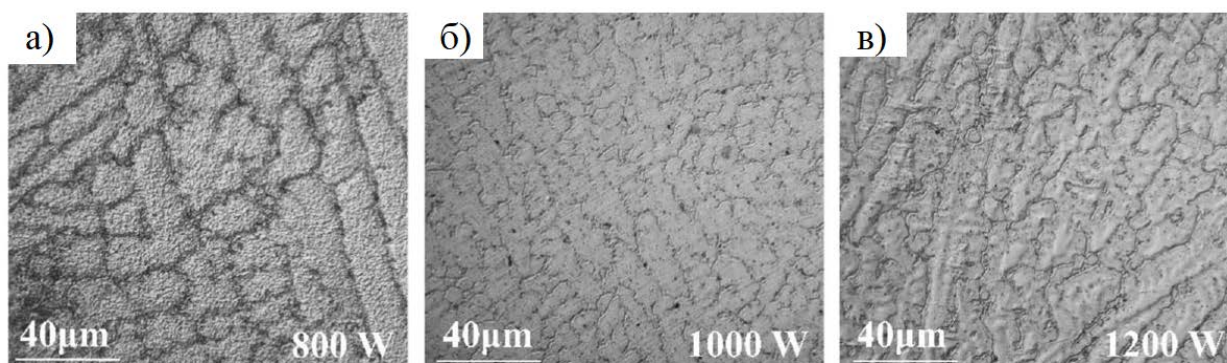


Рисунок 1.8 – Микроструктура покрытия, полученная при мощности лазерного излучения: 800 Вт (а), 1000 Вт (б), 1200 Вт (в)

Композиционное покрытие Ni/Mo наносили на поверхность медного сплава с помощью коаксиальной лазерной наплавки [42] по следующим режимам: мощность лазерного излучения 6000 Вт, скорость сканирования 5 мм/с, подача порошка 10 г/мин. Поверхностный слой состоял из трех слоев Ni и двух слоев Mo. Из-за неравновесной кристаллизации молибдена в молибденовом слое наблюдались поры и трещины по границам зерен. Поверхностная твердость слоя Mo составляла от 200 до 460 HV [43].

На рисунке 1.9 показано, что в наплавленном молибденовом слое, трещины в основном распространялись по границам зерен. Это происходит в результате неравновесной кристаллизации. Из-за быстрого нагрева и охлаждения в слое возникали большие остаточные напряжения. В процессе кристаллизации на границе зерен происходит растрескивание под действием напряжений.

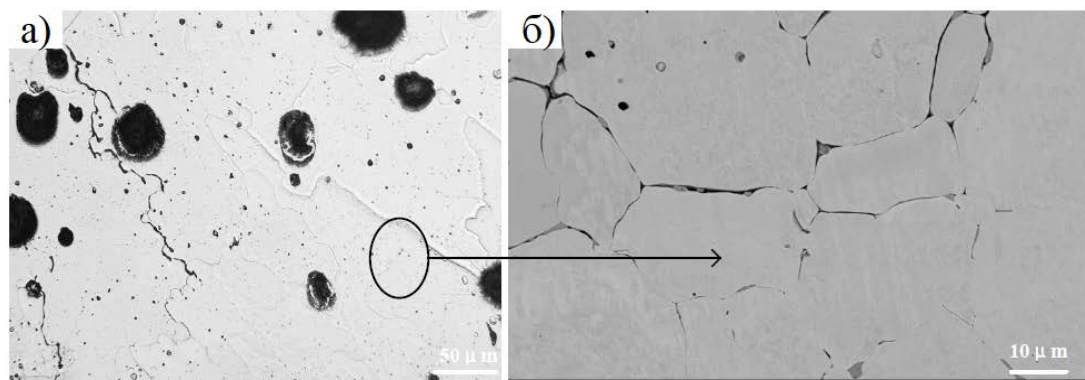


Рисунок 1.9 – Микроструктура наплавленного слоя Мо (а), увеличенное изображение выделенной области (б)

В работе [44] исследовали покрытия из сплава Ni-Cr-Mo с различным содержанием Cr полученные лазерной наплавкой на подложку из углеродистой конструкционной стали. Покрытия имели аналогичный фазовый состав, содержащий твердый раствор γ -Ni и аналогичную микроструктуру, состоящую из первичных зерен и эвтектик с сегрегациями Mo. Увеличение содержания Cr привело к получению более плотной защитной пассивной пленки и к большему упрочнению внутреннего слоя. Коррозионная стойкость сначала ухудшалась при увеличении содержания Cr с 18 мас.% до 22 мас.%, а затем улучшалась при увеличении содержания Cr с 22 мас.% до 26 мас.%.

Авторами работы [45] проведены исследования лазерной наплавки порошков высоко энтропийных сплавов FeCoCrNi и FeCoNiCrMo_{0,2} (полученных методом газового распыления) на поверхность нержавеющей стали 304. Исследовано влияние Mo на микроструктуру лазерно-наплавочного покрытия FeCoCrNi и его коррозионную стойкость. Добавление Mo приводит к значительному увеличению размера дендритов в средней области покрытия

FeCoCrNiMo_{0,2}, покрытие FeCoCrNiMo_{0,2} обладает высокой коррозионной стойкостью.

Исследования лазерной наплавки с использованием порошковых смесей Ni-Mo-Si на подложку из аустенитной нержавеющей стали, показывают, что микроструктура покрытия состоит из первичных дендритов и междендритной эвтектики [46]. Благодаря наличию большого количества твердой и износостойкой фазы, наплавленное лазером композиционное покрытие содержащие силициды металлов, обладает превосходной износостойкостью в условиях испытаний на износ при трении скольжения при высоких температурах.

Сплавы Mo-Si-B считаются перспективными в качестве высокотемпературных конструкционных материалов для авиационных двигателей следующего поколения и гиперзвуковых транспортных средств из-за их чрезвычайно высокой температуры плавления (выше 2000 °C), превосходной жаропрочности, хорошей стойкости к высокотемпературному окислению и сопротивлению ползучести [47]. Использование сплавов Mo-Si-B позволит повысить температуру предтурбинных газов авиадвигателей на 400 °C, что значительно повысит эффективность авиадвигателей [48, 49].

Технологии аддитивного производства с использованием лазерного излучения (селективное лазерное плавление и лазерная наплавка) обеспечивают высокую скорость охлаждения, при этом реализуется новый способ трехмерного формообразования сплавов Mo-Si-B. Структуры, формирующиеся при лазерной наплавке сплава Mo-Si-B обладают более высокой стойкостью к окислению [50] и вязкостью разрушения [51], что указывает на большие преимущества технологии аддитивного производства для сплавов Mo-Si-B. Однако сплавы Mo-Si-B имеют высокие показатели хрупкости, поэтому аддитивное производство сплавов Mo-Si-B по-прежнему сталкивается с серьезными проблемами. Первое успешное изготовление деталей с помощью лазерной наплавки сплавов Mo-Si-B было достигнуто авторами работы [52], которые получили наплавленный слой длиной около 3 мм без трещин путем индукционного нагрева подложки до 600 °C.

Микротвердость наплавленного слоя была сравнима с микротвердостью литого сплава.

Авторы работ [53, 54] также успешно использовали метод СЛП для трехмерного формования измельченных в шаровой мельнице порошков сплава Mo-Si-B-Ti-C. Благодаря быстрому процессу затвердевания получили мелкозернистую структуру и равномерное распределение наночастиц TiC, но микротвердость слоя была ниже, чем у литого сплава того же состава из-за наличия микротрещин внутри материала.

В исследовании [55] разработали параметры процесса лазерной наплавки сплавов Mo-Si-B, обеспечивающие получение образцов без трещин.

В работе [56] исследовали сплав Mo-Si-B, полученный по технологии СЛП, определяли плотность и механические свойства при различных параметрах процесса и разном соотношении компонентов сплава. Установлено, что сплав Mo-Si-B с атомным составом: Mo (93,5 ат. %), Si (4,5 ат. %) и B (2 ат. %), при мощности лазерного излучения 250 Вт, скорости сканирования 500 мм/с и толщине слоя 60 мкм имеет наибольшую плотность 94,22% (рисунок 1.10).

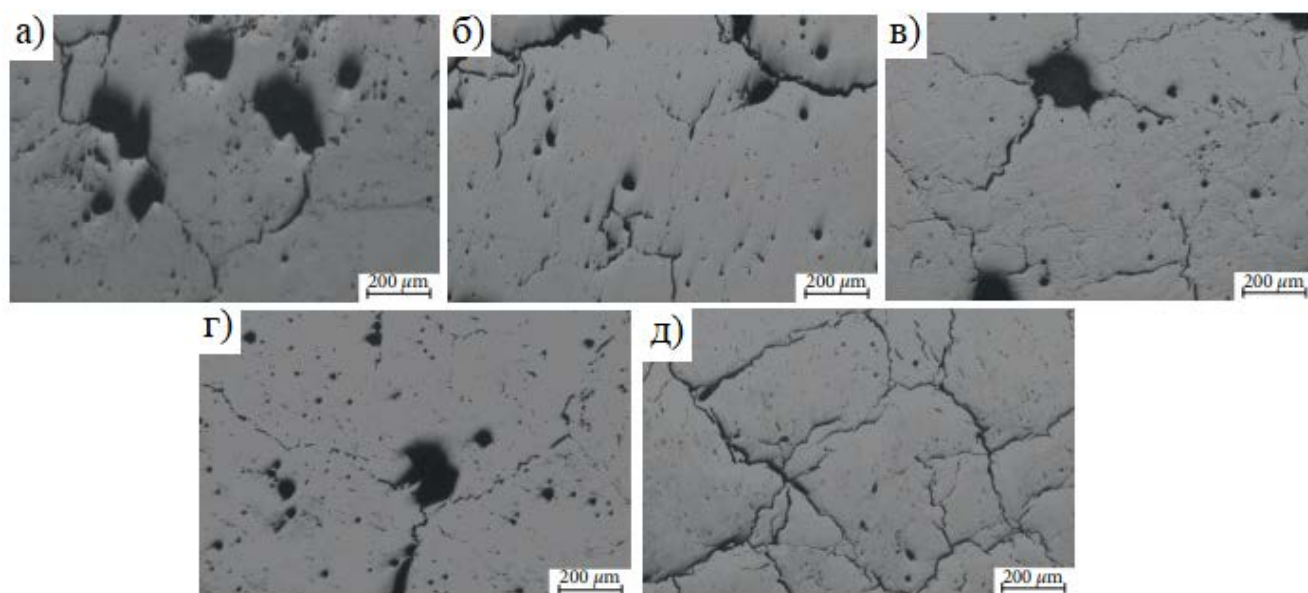


Рисунок 1.10 – Микроструктуры Mo-Si-B полученные методом СЛП при комбинациях мощности лазерного излучения и скорости сканирования:

250 Вт и 400 мм/с (а), 250 Вт и 500 мм/с (б), 300 Вт и 500 мм/с (в),
300 Вт и 400 мм/с (г), 325 Вт и 400 мм/с (д)

Известны исследования селективного лазерного плавления чистого молибдена [57]. Авторы подчеркивают, что трудности получения качественного слоя при СЛП обусловлены высокой температурой плавления молибдена и высокой температурой перехода молибдена из пластичного состояния в хрупкое. В интервале плотности мощности от 0,44 до 0,64 Дж/мм авторам удалось получить ровные единичные треки с небольшим количеством пор и микротрещин (рисунок 1.11). Максимальная плотность чистого молибдена, полученного селективным лазерным плавлением, составила 99,1%.

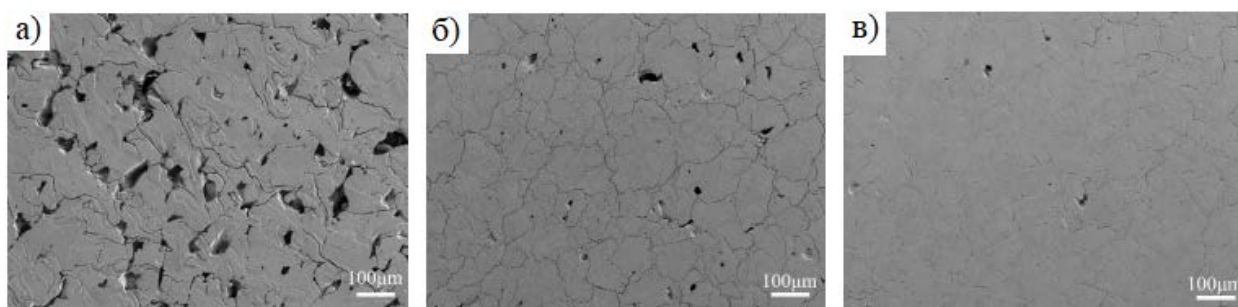


Рисунок 1.11 – Микроструктура поперечного сечения слоя Мо, полученного методом СЛП при плотности мощности: 0,36 Дж/мм (а), 0,64 Дж/мм (б), 0,51 Дж/мм (в)

Авторы работы [58] достигли повышения относительной плотности при мощности лазерного излучения 200 Вт. Они пришли к выводу, что плотность повышается с увеличением мощности лазерного излучения. Также было показано, что при мощности лазерного излучения 400 Вт относительная плотность возрастает до 99,1%. В работе [59] показано, что горячие трещины при селективном лазерном плавлении молибдена вызваны наличием примесей кислорода. Многообещающим подходом к производству бездефектных металлических деталей из тугоплавких материалов с помощью селективного лазерного плавления считается легирование [60, 61].

В работе [62] проводили селективное лазерное плавление порошка молибдена, легированного углеродом. В работе использовали чистый молибден и порошок молибдена легированный углеродом. Показано, что легирование

молибдена углеродом в количестве 0,45 вес. % позволяет изготавливать детали из молибдена, без трещин, с механической прочностью, сравнимой с прочностью изделий, полученных традиционным способом. Для полного подавления трещин и увеличения относительной плотности до 99,7 % (абсолютная плотность 10,08 г/см³) авторы предлагают, подогрев подложки до 800 °С.

Анализ литературных источников показывает перспективность развития изготовления биметаллических изделий методами аддитивного производства, а частности коаксиальной лазерной наплавкой.

В достаточной степени исследованы процессы коаксиальной лазерной наплавки композиционных сплавов тугоплавких материалов в состав которых входит Мо. Работ по коаксиальной лазерной наплавке «чистого» порошка Мо 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.

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.

1.3 Материалы, применяемые для лазерной наплавки

Для лазерной наплавки в качестве наплавочного материала применяют порошок или проволоку. Преимущество применения проволоки по сравнению с порошком это повышенный КИМ, который достигает до 100%. Но учитывая, что на данный момент технологии получения материалов для АП развиваются ускоренными темпами, применение металлической проволоки для лазерной наплавки по-прежнему ограничена в виду отсутствия широкой номенклатуры материалов. Поэтому лазерная наплавка порошка более распространена.

Для лазерной наплавки применяют порошки различных фракций (от 20 до 250 мкм), форм и химического состава. Наиболее подходящей является

сферическая форма частиц порошка, которая обеспечивает минимальное сопротивление в системах подачи порошка, т.е. хорошую текучесть. Форма частиц порошка во многом зависит от методов производства.

Достижения классической порошковой металлургии позволяют производить широкий спектр порошковых материалов требуемого качества для применения их в АП. Металлопорошковые материалы для АП и, в частности, для лазерной наплавки производятся теми же методами, но с учетом требований, предъявляемых к ним по химическому и гранулометрическому составу.

1.3.1 Технологии изготовления металлических порошковых материалов для аддитивного производства

Существуют разнообразные методы получения металлических порошков их разделяют на физико-химические и механические. К физико-химическим относят методы, связанные с физико-химическими превращениями исходного сырья, при этом химический состав и структура порошка значительно отличается от исходного материала. Механические методы обеспечивают производство порошка без существенного изменения химического состава. К механическим методам относят многочисленные варианты размола в специальных мельницах и распыление жидкого металла (атомизация) с помощью струи газа.

Частицы порошков, получаемые механическим измельчением методами размола, имеют осколочную, неправильную форму. Также данный метод обеспечивает достаточно крупный средний размер частиц от 50 мкм и выше. Разрушения крупных частиц на более мелкие наблюдаются в местах образования концентраторов напряжения (в основном трещин). Таким образом, при измельчении форма частицы зависит от траектории распределения трещин, которые чаще всего проходят по границам зерен, пор и локационных зон. В порошке, изготовленном механическим измельчением, содержится относительно большое количество примесей – продуктов износа размольных тел и футеровки

мельниц. Несмотря на то, что данный способ является самым дешевым его, как правило, не применяют для получения порошков, используемых в АП.

Распыление расплава наиболее производительный и эффективный способ получения порошковых материалов. Распыление (атомизация) широко применяется при производстве порошков многокомпонентных сплавов с аморфной структурой, которая позволяет достичь равномерного химического состава, даже при содержании легирующих компонентов выше их предела растворимости в основе. Порошки, полученные диспергированием расплава, имеют форму частиц близкую к сферическим. Подавляющее большинство порошков (около 90%) применяемых в АП получают методами атомизации: центробежной, газовой и вакуумной.

Центробежная атомизация – процесс расплавления металла под с помощью различных источников энергии и кристаллизации капель жидкого металла под действием центробежных сил. После расплавления, жидкий металл подается на вращающуюся поверхность и под действием центробежных сил расплавленный металл образует большое количество капель, которые кристаллизуются в полете. Для предотвращения окисления весь процесс происходит в защитной атмосфере (как правило, в среде инертного газа). В результате центробежной атомизации образуются частицы сферической формы. Данная технология позволяет получать металлические порошки различных металлов и сплавов, в том числе и тугоплавких. Полученные таким образом металлические порошки используются в различных методах аддитивного производства.

Широкое распространение получил процесс газовой атомизации. Металл расплавляют в плавильной камере в защитной атмосфере (в вакууме или в среде инертного газа), затем сливают через специальное сопло-распылитель, где жидкий поток металла распыляется под давлением инертного газа. Технологии имеют свои особенности в зависимости от метода их реализации и технических решений.

Технология VIGA (Vacuum Induction Melt Inert Gas Atomization) газового распыления металла, расплавленного в вакуумной камере, методом

индукционного нагрева описана авторами работы [63]. Данной технологией получают порошки на основе никеля, кобальта и высоколегированных сталей. В конструкцию оборудования для данной технологии чаще всего входят керамические тигли и форсунки из-за чего не удастся получать порошки активных металлов, которые взаимодействуют с материалом тигля – например титана.

Технология EIGA (Electrode Induction Guide Inert Gas Atomization) – процесс индукционной плавки электрода с распылением металла в инертном газе. Расплавление металла происходит не в тигле, а путем плавления электрода в виде прутка. Данная технология разработана для получения порошков активных металлов: Ti, Zr, Hf, V, Pt, Ir, Nb, Mo и др. поскольку плавка этих металлов в тиглях затруднена даже в вакууме. Плавление происходит путем опускания медленно вращающегося электрода в индуктор. Капли жидкого металла попадают в систему форсунок и распыляются инертным газом [64].

Универсальный процесс вакуумной атомизации при котором расплавление металла происходит в камере с избыточным давлением инертного газа, который растворяется в жидком металле. Жидкий металл под действием избыточного давления поступает к распылительному соплу (форсунке) на выходе из которого создан вакуум. Возникающий перепад давления побуждает растворенный газ к выходу на поверхность капель расплава и «взрывает» капли изнутри. Таким образом возможно получать порошки сферической формы различной фракции.

Физико-химические методы получения порошка не получили широкого распространения в АП. Эти методы основаны на физико-химическом превращении исходного материала. Наиболее распространен метод, основанный на химической восстановительной реакции, заключающийся в восстановлении металлов из растворов. Данными методами можно получать достаточно чистые металлические порошки, размерами от 60 мкм, но не сферической формы.

Электролиз – один из разновидностей физико-химических методов получения порошка. Электролизная технология основана на получении порошков

из растворов или расплавов солей металлов под действием электрического тока [65].

Следует отметить, что получение металлических порошков механическими или физико-химическими методами является лишь одним из этапов производства материалов для АП. Полученное сырье вышеописанными методами, необходимо преобразовать в соответствии со стандартами отрасли или под конкретное техническое задание заказчика. Ни одна из технологий не гарантирует получение заданной формы и размера порошка, для этого предусматривается просеивание в ситах или дальнейшая переработка (сфероидизация – изменение морфологии порошка в потоке плазмы) [66].

1.3.2 Производство отечественных металлических порошковых материалов для аддитивного производства

В целях развития импортозамещающих перспективных технологий в России идут работы по производству установок и методов получения порошков с необходимыми характеристиками для применения в АП. Многие отечественные предприятия порошковой металлургии, в том числе и научно-исследовательские институты разрабатывают технологии и налаживают производство металлических порошков необходимых для аддитивного производства.

Технология ГИРЕДМЕТ («Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности») предназначена для производства сферических титановых порошков из отходов титана марок ВТ1 и ВТ6. Данная технология предусматривает гидрирование для образования хрупкого соединения TiH_2 , с последующим измельчением и дегидрированием [67]. Получаемая фракция порошков от 15 до 40 мкм, форма частиц околосферическая, содержание примесей не более 0,05 %.

Технология ВНИИХТ («Всероссийский научно-исследовательский институт химической технологии») представляет собой метод получения порошков с

размером от 20 до 40 мкм из нержавеющей стали и заключается в металлотермическом восстановлении хлоридов металлов в расплаве солей. Изначально получается порошок неправильной формы, а затем производится его сфероидизация. Сферическая форма частиц порошка достигается вводом порошка под срез сопла в область разряда в центре потока плазмы, созданной тремя анодами, охватывающими поток со всех сторон [68].

Технология ВНИИНМ («Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара») получения порошков сложнолегированных сплавов методом центробежного распыления расплава из вращающегося гарнисажного тигля [69]. Исходное сырье измельчают до размера от 40 до 100 мкм в инертной атмосфере и расплавляют в тигле, затем расплав подается в установку и под действием центробежных сил вылетающие капли получают сферическую форму.

Технология ВИАМ («Всероссийский институт авиационных материалов») предусматривает получение сверхчистых порошков на основе титановых и никелевых сплавов методом атомизации [70]. ВИАМ дальше остальных институтов продвинулся в разработке отечественных порошковых композиций по технологии получения биметаллических и полиметаллических естественно армированных металлических материалов. Также ВИАМ выступает одним из основных разработчиков нормативно-технической документации (НТД) регламентирующей требования к материалам и методам их контроля для применения в АП [71].

Технология ВИЛС («Всероссийский институт легких сплавов») основана на получении порошка методом центробежного распыления. Производится порошок из сплавов на основе титана, алюминидов титана, никеля, кобальта и железа. Процесс изготовления порошка включает плавку заготовки плазменной струей и дальнейшее центробежное распыление в инертном газе [72].

На основе разработанных технологий НИИ организуют предприятия по промышленному производству металлических порошков для АП, часть НПО

используют импортное оборудование. Таким образом, в настоящее время идет интенсивное развитие данного направления в России.

1.3.3 Анализ порошковых материалов для аддитивного производства

Порошковые материалы перед применением в аддитивном производстве подвергаются входному контролю. Целью данной процедуры является подтверждение соответствия исходного порошка требуемым параметрам, а также проверка параметров, заявленных производителем материала. Основными показателями качества порошковых материалов для АП и в частности для лазерной наплавки являются их химический и гранулометрический состав [73].

Химический состав порошка показывает поэлементное содержание основных компонентов и примесей. Методы химического анализа порошковых материалов для АП, аналогичны методам, применяемым в традиционных технологиях. При химическом анализе порошковых материалов важную роль играет определение содержания кислорода в порошке т.к. от этого зависит качество получаемых изделий, изготовленных по аддитивной технологии.

Гранулометрический анализ – определение дисперсионного состава порошка и формы его частиц. Дисперсионный состав порошков является основным критерием применения в аддитивном производстве. На данный момент существует несколько методов определения дисперсного состава: ситовой, седиментационный и микроскопический.

Ситовой метод самый простой и быстрый метод анализа, не требующий дорогостоящего оборудования и специальных программ. Ситовой метод основан на просеивании порошка через систему сит или контрольное сито с определенным размером ячеек. В качестве сравнения выступает отношение массы просеянного порошка к исходной массе пробы или партии.

Редко в качестве исходного материала применяют суспензии – смесь, где частицы порошка распределены в жидкости во взвешенном состоянии. Такие

коллоидные растворы также необходимо контролировать, для этого применяется седиментационный анализ. Суть анализа: в осадок выпадают более крупные частицы, по которым и происходит анализ.

Наиболее распространённый метод анализа порошка в АП является микроскопический. Кроме размеров частиц порошка, данный метод позволяет определить его форму и конкретные характеристики, связанные с его морфологией (просеивочный и средний диаметр, сферичность и т.д.) [74]. Суть метода в оптическом (с помощью микроскопа) определении размеров и форм порошка с помощью тени полученной от частицы.

Развитие данного метода связано с автоматизацией процесса с помощью специальных программ, которые измеряют тысячи частичек порошка (ранее приходилось измерения проводить вручную). Благодаря автоматизации на данный момент – это самый распространённый способ гранулометрического анализа порошковых материалов, применяемых в АП.

1.4 Традиционные технологии изготовления биметаллических деталей

Основными традиционными технологиями изготовления биметаллических деталей являются:

- холодная и горячая прокатка;
- различные методы литья;
- различные виды сварки и пайки.

Значительно реже применяются прессование, волочение и напыление для изготовления биметаллических деталей.

Как правило для производства биметаллических заготовок, листов, труб, профилей и прутков применяют прокатку. Технология прокатки состоит из множества технологических операций: подготовка поверхности (очистка, травление, обезжиривание), сборка составных частей, прокатка, резка, термическая обработка, правка и отделка готовой поверхности. Для предотвращения окисления прокатываемых слоев применяют различные способы

защиты поверхности. Наносят покрытия различными способами, например, гальваническим медом или газотермическим или газодинамическим напылением. Также применяют разделительные слои из фольги или других материалов. Для обеспечения лучшей адгезии используют промежуточные слои (плакирование). Прокатка редкоземельных или тугоплавких материалов проводится на оборудовании с возможностью вакуумирования рабочего пространства. Одной из главных проблем при прокатке является расслоение материалов. К недостаткам данной технологии (прокатки) можно отнести довольно простую форму получаемых изделий и большое количество технологических операций [75].

Литье биметаллических изделий осуществляется несколькими способами. Комбинированное литье заключается в следующем: в изложницу закладывают перфорированные разделительные листы металлов (а и б), между будущими соединениями между металлами и заливают жидкий металл (а и б) в зазор между изложницей и пластинами. Другим способом является заливка металла в изложницу из плакирующего слоя и на пластину с бортиками [76]. Цилиндрические биметаллические отливки получают методами центробежного литья. Методы литья биметаллических изделий являются более простыми по сравнению с прокаткой, однако у данных методов существуют технологические ограничения: плохая заполняемость металла в узких зазорах между изложницей и пластинами (сильно ограниченная минимальная толщина заготовок), невозможность получения изделий из металлов, образующих легкоплавкие фазовые состояния.

Наиболее распространенной традиционной технологией изготовления биметаллических деталей является сварка и пайка. Все виды сварки можно разделить на классы по форме приложенной энергии:

- термический;
- термомеханический;
- механический.

Термический класс объединяет в себе процессы, происходящие за счет использования различных видов тепловой энергии, самые распространенные дуговая и газовая сварка.

Термомеханический класс предполагает два вида воздействия: нагрев и прилагаемое давление. Ярким примером служит контактная сварка, когда электроды одновременно разогревают и сжимают детали. Гораздо реже встречается дугопрессовая, диффузионная и кузнечная сварка.

К механическому классу относят сварку трением, ультразвуковую сварку и сварку взрывом [77].

Существует достаточно большое количество классифицируемых параметров с помощью которых определяют вид пайки: по способу получения припоя, по источнику нагрева, по характеру заполнения зазора припоем, по типу кристаллизации шва и др. По данной классификации выделяют два вида пайки: пайка готовым припоем и реакционно-флюсовая пайка [78]. Для изготовления биметаллических деталей наиболее благоприятной является пайка готовым припоем.

При пайке готовым припоем – плавление припоя происходит в результате нагрева. Припой заполняет зазор между деталями/заготовками и за счет действия капиллярных сил удерживается в нем. К этому типу относится вакуумная диффузионная пайка.

При реакционно-флюсовой пайке процесс обеспечивается за счет реакции вытеснения, происходящей между основным материалом и флюсом для пайки. Итогом этого процесса является образование припоя.

К недостаткам всех видов пайки можно отнести невысокую, в сравнении со сварочным швом, прочность соединения. Это напрямую зависит от свойств материала, применяемого в качестве припоя. Низкую жаропрочность (узкое применение в изделиях, эксплуатируемых в условиях высоких температур) и низкий уровень производительности труда.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

1. В результате анализа литературных источников установлено, что для изготовления сложнопрофильных биметаллических деталей наиболее целесообразно использование технологии коаксиальной лазерной наплавки.

2. Лазерная наплавка тугоплавких материалов изучена достаточно полно, однако, наплавка порошков на основе Мо изучена недостаточно, особенно с точки зрения получения функциональных слоев без дефектов в виде пор и трещин. Исследования применения отечественных материалов (порошков Мо) для коаксиальной лазерной наплавки в литературе не встречаются.

3. Аналитический обзор литературных источников показал довольно низкую степень разработанности выбранного направления работы и подтвердил актуальность исследования.

4. Установлено, что наплавленные слои из тугоплавких материалов обладают лучшими характеристиками по сравнению с традиционными методами их получения, что способствует повышению работоспособности изделий.

5. Мониторинг проблем, возникающих при изготовлении биметаллических деталей традиционными методами на ряде предприятий, показывает необходимость поиска альтернативных технологий.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1 Материалы и оборудование, используемые при коаксиальной лазерной наплавке

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. 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.

2.1.1 Выбор материалов для коаксиальной лазерной наплавки

Материалы для коаксиальной лазерной наплавки выбирали, основываясь на поставленной цели работы – изготовление биметаллических деталей с использованием наплавленных металлических порошков на конструкционные стали. На сегодняшний день в ряде отраслей промышленности существует потребность в изготовлении биметаллических изделий из молибдена (и сплавов на его основе) и углеродистой стали. Коаксиальная лазерная наплавка таких материалов изучена недостаточно, особенно с точки зрения получения функциональных слоев без дефектов в виде пор и трещин. Для исследования выбран молибденовый порошок с минимальным количеством примесей. Согласно требованиям по использованию материалов в технике специального назначения – необходимо выбрать материал отечественного производства.

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.

Выбранные порошки имеют минимальное содержание примесей. Химический состав и физические свойства молибденовых порошков марок ПМ-М и ПМС-М99,9 приведены в таблицах 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 – Химический состав порошков ПМ-М и ПМС-М99,9

Марка порошка	Массовая доля элемента, %		
	Основы, не менее	Примесей, не более	
	Мо	Сумма металлических примесей (Al, Fe, K, Ca, Si, W, Mg, Ni, Na, Mn, Zn)	O
ПМ-М	99,8	0,2	0,025
ПМС-М99,9	99,9	0,1	0,025

Таблица 2.2 – Физические свойства порошков ПМ-М и ПМС-М99,9 [79]

Марка порошка	Текучность, с	Насыпная плотность, г/см ³	Плотность после утряски, г/см ³
ПМ-М	6,5	3,96	5,3
ПМС-М99,9	10,4	6,4	7,14

Для разработки режимов наплавки использовали подложки из литой стали марки 25Л. Подложки представляют собой пластины с габаритными размерами: 100x100 мм, толщиной 10 мм и шероховатостью Ra 6,3. Для исключения дополнительных параметров, влияющих на результаты лазерной наплавки,

подложки были изготовлены из стали одной плавки. Химический состав подложек представлен в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Химический состав стальной подложки

Массовая доля элемента, %					
Основных компонентов				Примесей	
Fe	C	Mn	Si	S	P
основа	0,30	0,54	0,51	0,019	0,024

2.1.2 Оборудование для коаксиальной лазерной наплавки

Разработка режимов наплавки одиночных валиков (сталь-молибден) проводилась на отечественной установке серии МЛ7 (рисунок 2.1) разработанной в фирме «Лазеры и аппаратура» (РФ, г. Зеленоград).

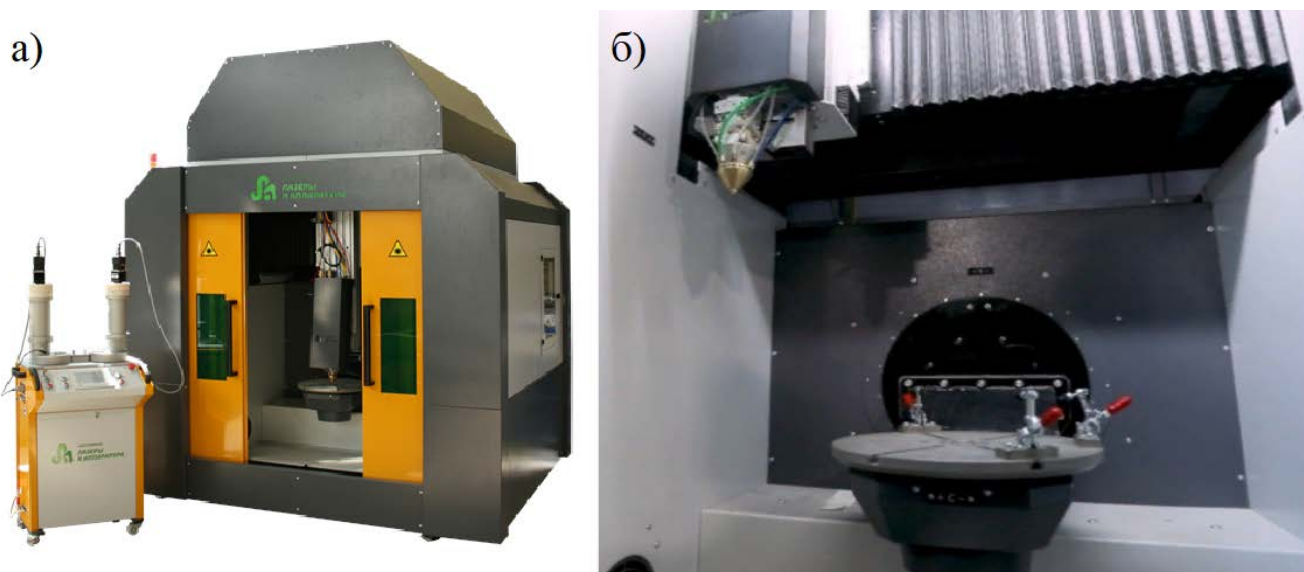


Рисунок 2.1 – Внешний вид установки лазерной наплавки МЛ7 (а), рабочая камера построения (б)

Технические характеристики установки МЛ7 представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Технические характеристики установки МЛ7 [80]

Параметр	Значение
Габариты области построения (ШхДхВ), мм	не менее 400х400х400
Координатная кинематическая система	3-х/5-ти осевая
Точность позиционирования, мм/м	не более 0.05
Длина волны излучения, мкм	1,06 – 1,07
Мощность излучения, Вт	не более 2000
Фокусное расстояние объектива, мм	200
Диаметр пятна, мкм	мин. 100
Фракция порошка питателя, мкм	5 – 200
Подача порошка, г/мин	не более 300

Разработка режимов наплавки первого слоя (сталь-молибден) и режимов наплавки трехмерных объектов выполнялись на установке КЛП 400 (рисунок 2.2) разработки МГТУ им. Н.Э. Баумана (РФ, г. Москва).



Рисунок 2.2 – Внешний вид установки КЛП 400

Технические характеристики установки прямого лазерного выращивания металлических изделий КЛП 400 представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Технические характеристики установки КЛП 400 [81]

Параметр	Значение
Габариты области построения (ШхДхВ), мм	400х400х400
Координатная кинематическая система	5-ти осевая
Точность позиционирования, мм/м	0,03
Длина волны излучения, мкм	1,07
Мощность излучения, Вт	не более 3000
Фокусное расстояние объектива, мм	200
Диаметр пятна, мкм	мин. 120
Фракция порошка питателя, мкм	40 – 200
Подача порошка, г/мин	не более 300

Установки МЛ7 и КЛП 400 аналогичны и имеют практически одинаковые основные технические характеристики. Обе установки отечественной разработки и производства. В соответствии с классификацией ГОСТ Р 57588 по категории используемых аддитивных процессов, установки МЛ7 и КЛП 400 предназначены для процесса прямого подвода энергии и материала.

Схема процесса коаксиальной лазерной наплавки установок МЛ7 и КЛП 400 идентична и представлена на рисунке 2.3. В рабочем пространстве установки, к столу 1 фиксируют подложку 2 с помощью специальных креплений 3. Верхняя кинематическая система 4 реализует движение лазерно-оптического модуля 5 в координатах X-Y. Лазерно-оптический модуль состоит из фокусирующей оптики (скрытую защитными кожухами) и лазерной головки 6 со специальным коаксиальным соплом 7. При наплавке металлический порошок подается из специального дозатора по каналам 8 в среде инертного газа в коаксиальное сопло. Газопорошковая смесь подается в область расплава. Защитный газ подается по специальным каналам 9. Подача газопорошковой струи и лазерной энергии образует коаксиальный поток 10, который подводится в область наплавки, тем самым обеспечивая нанесение валиков 11 на подложку. Для наплавки деталей сложной формы применяется координатно-кинематическая система 12 обеспечивающая движение стола в координатах X-Y-Z с возможностью поворота стола вокруг своей оси.

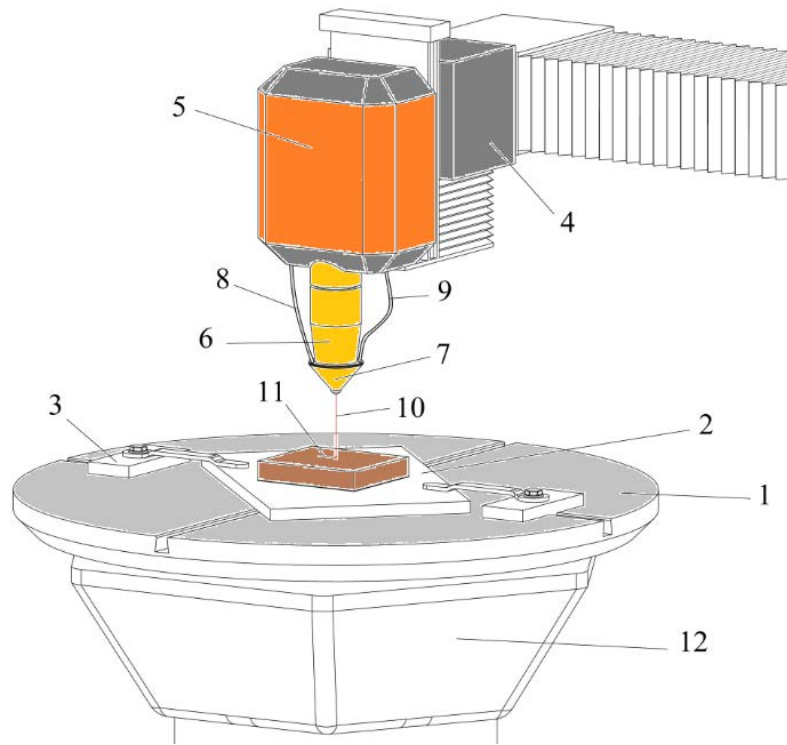


Рисунок 2.3 – Схема процесса коаксиальной лазерной наплавки

Формообразование детали может быть осуществлено как 3-х осевыми перемещениями наплавляющей головки, так и 5-ти осевыми для деталей сложной формы. Наглядное представление о возможности поворота оси наплавляющего сопла к образующей поверхности дают две схемы наплавки порошка (рисунок 2.4).

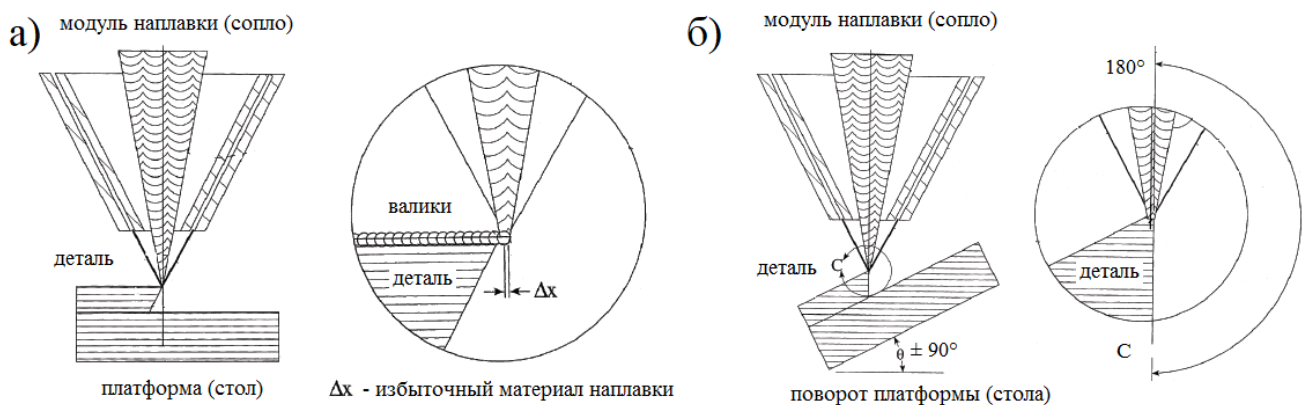


Рисунок 2.4 – Формообразование на установке с координатной кинематической системой 3-х осевой (а), 5-ти осевой (б)

Если не выдержать перпендикулярность оси сопла к образуемой поверхности, то на каждом слое наплавки остается впадина (из-за недостатка материала) или выступ (размером Δx избыточного материала). Если во время наплавки в крайней точке траектории наклонить ось относительно детали на угол Θ , выдерживая перпендикулярность, то такая погрешность формы не образуется. Геометрическая точность готовой детали будет значительно выше [82].

Стоит отметить, что основными преимуществами установок МЛ7 и КЛП 400 являются: отечественная разработка и производство (со своим ПО), 5-ти координатно-кинематическая система, возможная вариативность основных модулей и периферийного оборудования.

2.2 Материалы и оборудование, используемые при традиционной технологии изготовления биметаллических деталей углеродистая сталь-молибден

При проектировании и разработке высокотехнологичной техники, изначально закладываются и учитываются массовые технологии изготовления деталей из заготовок с максимальным коэффициентом использования металла. К таким технологиям относятся обработка металлов давлением (штамповка) и литье. Учитывая, что в высокотехнологичной технике используются пространственно-сложные детали, то основным методом получения таких деталей при низкой себестоимости является литье.

Наибольший интерес вызывает совместимость в одной детали различных сочетаний технологических, механических и физических свойств. С одной стороны, такая деталь должна быть технологически доступной и с низкой себестоимостью в изготовлении, с другой стороны обладать специальными эксплуатационными свойствами – таким сочетанием обладает биметалл. Для деталей, работающих при высоких температурах (в продуктах сгорания топлива), а также при износе в основном используют биметаллические детали углеродистая сталь – молибден.

Наиболее распространенная традиционная технология изготовления биметаллических деталей из таких пар материалов, как углеродистая сталь – молибден является вакуумная пайка.

2.2.1 Материалы, используемые при традиционной технологии изготовления биметаллических деталей

Для исследования процесса вакуумной пайки, в качестве материала основы образцов применяли углеродистую сталь марки 25Л в соответствии с требованиями ГОСТ 977 [83]. Химический состав образцов из стали 25Л представлен в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Химический состав стали марки 25Л

Массовая доля элемента, %					
Основных компонентов				Примесей, не более	
Fe	C	Mn	Si	S	P
основа	0,26	0,6	0,45	0,02	0,021

После литья заготовок из стали 25Л применяли режим термической обработки – нормализация и отпуск. Механические свойства образцов из стали 25Л после термической обработки приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Механические свойства стали марки 25Л

Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кДж/м ²
245	456	24	34	399

Для вакуумной пайки применяли пластины марки ВМ1, изготовленные из молибденового порошка методом спекания с последующей прокаткой [84]. Химический состав молибденовой пластины представлен в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Химический состав молибденовой пластины марки ВМ1

Массовая доля элемента, %										
Основных компонентов				Примесей						
Mo	Zr	C	Ti	O	W	Si	Fe	Ni	Al	Mg
основа	0,095	0,01	0,49	0,002	0,02	0,01	0,005	0,001	0,005	0,006

Перед пайкой пластины проходят входной контроль на соответствие предъявляемым требованиям механических характеристик. Механические свойства молибденовой пластины представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Механические свойства пластины марки ВМ1

Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %
540	6

Для соединения молибденовой пластины и стальной заготовки методом пайки в качестве припоя использовали медную ленту марки М1. Химический состав припоя марки М1 по ГОСТ 1173 представлен в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Химический состав медного припоя марки М1 [85]

Массовая доля элемента, %									
Основы, не менее	Примесей, не более								
Cu + Ag	Bi	Fe	Ni	Sn	Sb	As	Pb	S	O
99,90	0,001	0,005	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,004	0,05

2.2.2 Оборудование для вакуумной диффузионной пайки

При вакуумной диффузионной пайке молибдена и сплавов на его основе, как правило применяют вакуумные камерные электропечи сопротивления. В данной работе применяли вакуумную электропечь сопротивления типа СНВЭ (рисунок 2.5), разработки ВНИИЭТО (РФ, г. Истра).



Рисунок 2.5 – Внешний вид вакуумной электропечи типа СНВЭ

Данная печь предназначена для проведения различных термических процессов (пайка) в вакууме при температуре до 1600 °С или в среде инертных газов повышенной чистоты при предельном избыточном давлении не более 0,02 МПа. В таблице 2.11 представлены технические характеристики вакуумной электропечи типа СНВЭ.

Таблица 2.11 – Технические характеристики электропечи типа СНВЭ [86]

Параметр	Значение
Максимальная температура, °С	1600
Размеры рабочего пространства (ШхДхВ), мм	200х400х200
Масса деталей/узлов, загружаемых в камеру, кг	Не более 30
Среда в рабочем пространстве	Вакуум/Инертный газ
Предельное остаточное давление, Па (мм.рт.ст.)	Не более $1,064 \times 10^{-3}$, (8×10^{-6})
Материал нагревателей	Вольфрам
Материал экранной теплоизоляции	Молибден
Материал корпуса и крышек камеры	Сталь 12Х18Н10Т

В рабочей камере печи установлен блок, состоящий из теплоизоляционных экранов и нагревательных элементов, зигзагообразной формы из вольфрамового прутка, размещенных со всех сторон камеры. Используется экранная теплоизоляция, состоящая из боковых и торцевых молибденовых пакетов. Загрузка камеры горизонтальная и осуществляется вручную.

Данное оборудование разработано и производится в России, имеет несколько видов исполнения для конкретных задач. Основными достоинствами данных печей является высокая унификация, простота конструкции и управления, возможность работы в вакууме или в среде инертных газов. К недостаткам можно отнести относительно небольшой объем рабочей камеры, что затрудняет обработку средних и больших деталей.

2.3 Методики проведения экспериментов и исследований

2.3.1 Математическое планирование эксперимента

Описание поведения и прогнозирование состояния сложных технических объектов или процессов затруднено отсутствием достаточного количества математических моделей. При исследовании сложных многофакторных систем, к которым относится процесс коаксиальной лазерной наплавки, практически невозможно применять традиционный однофакторный эксперимент, заключающийся в поочередном изменении каждого из воздействующих факторов при фиксированных значениях остальных. В ряде случаев простым выходом из ситуации является использование регрессионных закономерностей, получаемых в ходе планирования эксперимента. К сожалению, регрессионные закономерности не дают представлений о типе протекающих в системе процессов и не могут быть использованы вне области планирования эксперимента.

При этом их достоинством является способность описания любого объекта или процесса при полном соблюдении алгоритма активного эксперимента. Полный факторный эксперимент является наиболее легко реализуемым среди многочисленных методов активного эксперимента. При использовании полного факторного эксперимента цель исследователя как получить линейную математическую модель процесса, так и определиться с дальнейшей стратегией проведения эксперимента. [87, 88].

В таблице 2.12 приведен алгоритм полного факторного эксперимента по теоретическому выбору основных параметров коаксиальной лазерной наплавки.

Таблица 2.12 – Алгоритм математического планирования эксперимента

Действие	Описание
Выбор параметра оптимизации и факторов, влияющих на параметр оптимизации	<p>При оптимизации процесса коаксиальной лазерной наплавки рассматривалось влияние факторов, непосредственно определяющих свойства наплавленного слоя – увеличение микротвердости.</p> <p>Влияющие факторы (параметры): мощность лазерного излучения (P, Вт), скорость сканирования (V, мм/мин) и расход порошка ($F_{\text{пор}}$, г/мин).</p>
Определение уровней факторов и интервалов варьирования	<p>Схема полного факторного эксперимента предусматривает одновременное варьирование всех исследуемых факторов на двух уровнях: верхнем – максимальном (Max), имеющем максимальное значение рассматриваемого фактора и нижнем – минимальном (Min), соответствующем минимальному значению фактора.</p> <p>Варьируемые параметры: мощность лазерного излучения от 360 до 500 Вт, скорость сканирования от 300 до 600 мм/мин и расход порошка от 2 до 6 г/мин.</p>
Кодирование значений	<p>Мощность лазерного излучения – x_1, 360 Вт – (-1), 500 Вт – (+1); Скорость сканирования – x_2, 300 мм/мин – (-1), 600 мм/мин – (+1); Расход порошка – x_3, 2 г/мин – (-1), 6 г/мин – (+1).</p>
Разработка матрицы планирования полного факторного эксперимента для трех факторов	<p>В этом случае число возможных комбинаций из трех факторов на двух уровнях равно $N = n^k = 2^3 = 8$. Необходимо провести восемь опытов с варьируемыми параметрами мощность лазерного излучения от 360 до 500 Вт, скорость сканирования от 300 до 600 мм/мин и расход порошка от 2 до 6 г/мин и определить микротвердость каждого из полученных валиков, полученных по режимам с варьируемыми параметрами.</p>

Продолжение таблицы 2.12

<p>Определение уравнения регрессии с учетом эффектов взаимодействия</p>	<p>Для полного факторного эксперимента типа 2^3 (где 3 – число факторов) уравнение регрессии с учетом эффектов взаимодействия можно представить выражением:</p> $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$ <p>или $y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{j,j=1 \\ j < i}}^n b_{ji} x_j x_i + b_{123} x_1 x_2 x_3$</p> <p>где b_0 – свободный член уравнения регрессии;</p> <p>b_i – коэффициенты линейного эффекта;</p> <p>b_{ji} – коэффициенты эффекта парного взаимодействия;</p> <p>b_{123} – коэффициенты эффекта тройного взаимодействия;</p> <p>n – число факторов;</p> <p>x_j и x_i – факторы эксперимента.</p>
<p>Расчет коэффициентов взаимодействия</p>	<p>Коэффициенты взаимодействия вычисляются по следующим формулам:</p> $b_i = \frac{\sum_{k=1}^N x_i Y_{k \text{ эксп}}}{N}, \quad b_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^N x_j x_i Y_{k \text{ эксп}}}{N}, \quad b_{123} = \frac{\sum_{k=1}^N (x_1 x_2 x_3)_i Y_{k \text{ эксп}}}{N}$ <p>где $Y_{k \text{ эксп}}$ – параметр оптимизации экспериментальный;</p> <p>N – число опытов;</p> <p>k – номер опыта.</p> <p>x_j и x_i – факторы эксперимента.</p>
<p>Проверка значимости коэффициентов регрессии</p>	<p>Для проверки значимости коэффициентов регрессии проводили дополнительные параллельные опыты для определения дисперсии воспроизводимости. Значимость каждого коэффициента в отдельности проверяли по критерию Стьюдента, при этом исключение из уравнения регрессии незначимого коэффициента не скажется на</p>

Продолжение таблицы 2.12

	<p>остальных коэффициентах. Величины коэффициентов уравнения регрессии характеризуют вклад каждого фактора. Полученное значение критерия Стьюдента сравнивали с табличным значением для соответствующего уровня значимости. Если расчетное значение доверительного интервала меньше табличного, то данные коэффициенты при работе с моделью исключаются из уравнения регрессии.</p>
<p>Проверка адекватности полученного уравнения регрессии по критерию Фишера</p>	<p>Расчетное значение критерия адекватности сравнивали с табличным значением (при соответствующем уровне значимости). Если расчетное значение меньше табличного, то полученное уравнение регрессии адекватно описывает эксперимент.</p>
<p>Анализ уравнения регрессии и разработка технологических карт</p>	<p>На основании полученного уравнения регрессии с помощью программного комплекса Mathcad построили технологические карты коаксиальной лазерной наплавки единичных валиков для определения режимов (мощность лазерного излучения, скорость сканирования, расход порошка) при реализации которых будут получены требуемые значения микротвердости наплавленных валиков.</p>

2.3.2 Гранулометрический анализ порошковых материалов

Гранулометрический анализ выбранных молибденовых порошков марок ПМ-М и ПМС-М99,9 проводился на грануломорфометре ОССНЮ 500 nano (Бельгия) (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Гранулометр ОСШЮ 500 nano

Гранулометрический анализ состоит из нескольких этапов:

- отбор пробы порошка навеской от 2 до 4 гр.;
- распределение частиц порошка по поверхности стеклянной пластины;
- определение геометрических характеристик частиц порошка путем сканирования поверхности пластины с порошком;
- статистическая обработка полученных данных с помощью специальной программы Callisto [89].

По результатам гранулометрического анализа построены интегральные и дифференциальные (гистограммы) кривые распределения частиц порошков марок ПМС-М99,9 и ПМ-М по размерам. Гистограмма распределения частиц порошка показывает процентное содержание частиц определенного размера.

2.3.3 Металлографический, микрорентгеноспектральный, рентгеноструктурный и химический анализы

Для анализа микроструктуры образцов пайки и лазерной наплавки шлифы подготавливали по стандартной методике с помощью шлифовально-полировальных установок, а также полировке вручную с помощью алмазной пасты. Микроструктуру образцов пайки и лазерной наплавки выявляли

травлением следующим способом: реактив – спиртовой раствор 4%-ой азотной кислоты, время травления от 10 до 20 с.

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 проводили по стандартной методике на оптико-эмиссионном спектрометре QSG 750 фирмы OBLF (Германия).

2.3.4 Определение механических и физических характеристик

Микротвердость зон наплавки и молибденовой пластины измеряли на универсальном автоматическом микротвердомере ITW Test & Measurement GmbH, Reicherter Wolpert - Wilson hardness group, (Германия) TUKON 2500. Твердомер предназначен для измерения твердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1:2007. Измерения на образцах проводили с нагрузкой 0,01 кг в соответствии с ГОСТ 9450-76.

Измерения механических свойств образцов из литой стали 25Л и молибденовой пластины ВМ1 проводились согласно стандартной методике по ГОСТ 1497 на испытательных машинах: Quasar 100 и Quasar 250 фирмы GALDABINI (Италия), FP-100/1 фирмы VEB MWK Fritz Heckert (Германия) и Instron 1195 фирмы Instron Ltd. (Великобритания).

Шероховатость поверхности образцов коаксиальной лазерной наплавки молибденового порошка измеряли согласно стандартной методике по ГОСТ 25142 и ГОСТ 27964 на профилографе-профилометре HOMMEL-TESTER T800 (Германия).

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

2.3.5 Методики исследования износостойкости

Исследования износостойкости при фреттинге образцов с защитными покрытиями, полученными с помощью пайки и лазерной наплавки проводились на машине трения (рисунок 2.7). Машина трения состоит из электромагнитного вибратора 1, который обеспечивает трение исследуемых образцов при возвратно-поступательном перемещении. Система нагружения в виде уравновешиваемого балансом рычага 4, передаёт в зону контакта 5 нормальную нагрузку, которая регулируется грузами различной массы. Системы регистрации и контроля параметров эксперимента включает: усилитель синусоидального сигнала (ММФ VEB METRA) и систему регистрации и контроля параметров: пьезоэлектрический датчик силы 3 – с разрешением $\Delta = 4 \text{ мН}$ и контроллер сигнала, лазерный датчик перемещения 2 ($D_{\text{max}} = \pm 250 \text{ мкм}$, разрешение $\Delta = 0,01 \text{ мкм}$) с контроллером. Для задания, контроля и мониторинга параметров трибологических испытаний использовалось специальное программное обеспечение.

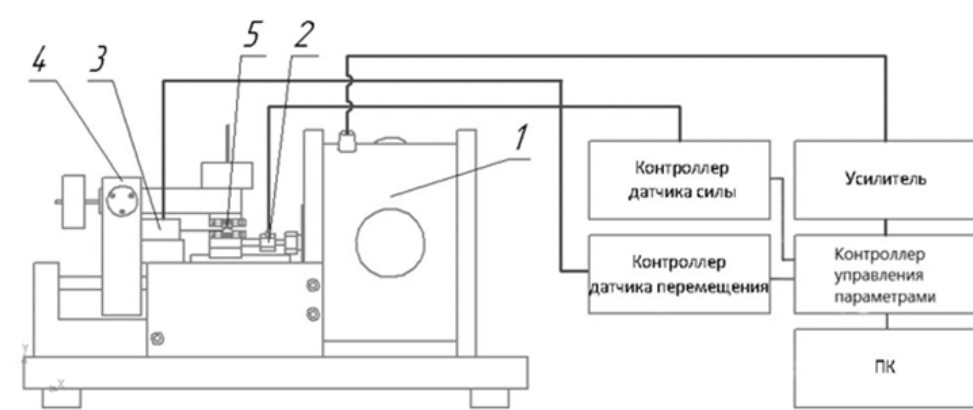


Рисунок 2.7 – Машина трения для исследования износостойкости

Оценка и определение коэффициента трения и износостойкости молибденового защитного слоя образцов пайки и лазерной наплавки проводилась на машине трения в возвратно-поступательном режиме по схеме сфера/плоскость. Сфера – керамический износостойкий шарик диаметром 10,6 мм из Al_2O_3 , плоскость – образцы, состоящие из подложки (сталь 25Л) и нанесенного молибденового слоя различными технологиями (лазерная наплавка и пайка). Параметры проводимых испытаний представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Условия испытаний образцов при фреттинге

Смещение D, мкм	Частота f, Гц	Нагрузка F_n , Н	Количество циклов, Nц	Окружающая среда
100	20	5	10^5	Атмосфера лаборатории

Перед исследованием образцы обезжиривались этиловым спиртом. В процессе проведения эксперимента постоянно фиксировались значения коэффициентов трения.

Измерение объёма износа и визуальная оценка трибологических изменений на поверхности образцов определялись с помощью оптического конфокального микроскопа Olympus LEXT OLS 5000 (Япония).

Измерение величины объемного износа образцов состоит из следующих этапов:

1. Фиксация пятна износа на оптическом микроскопе;
2. Определение зоны (пятна контакта) для расчета величины объема износа;
3. Определение экспозиции средней линии (оси поверхности), относительно которой будет проводиться расчет объема износа;
4. Расчет величины объема износа с помощью специального программного обеспечения.

Износостойкость в условиях абразивного изнашивания, определяли с помощью прибора Calowear фирмы CSM Instruments (Швейцария) схема которого представлена на рисунке 2.8.

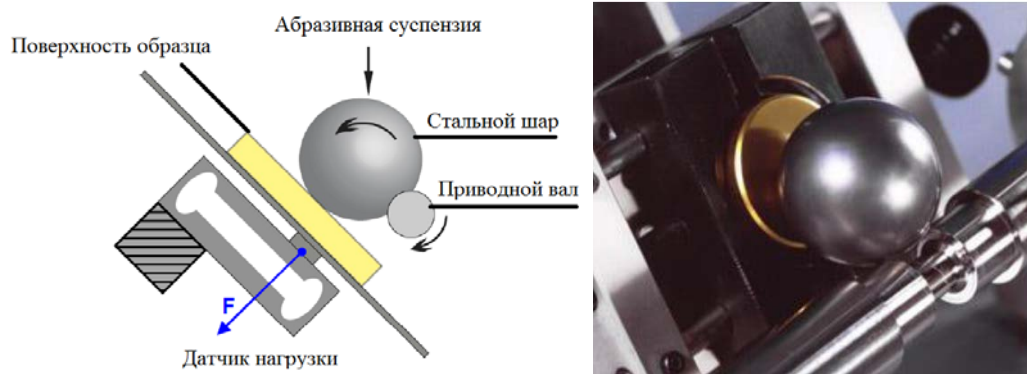


Рисунок 2.8 – Схема испытаний на износостойкость

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 равно 9,9 об/мин. Вращаясь, шар вырабатывает сферическую выемку износа на поверхности образцов. Размер получающейся выемки определялся при помощи оптического микроскопа.

Объем износа вычисляли по формуле

$$V = \left(\frac{\pi \cdot d^4}{64R} \right) \quad (2.1)$$

где V – объем износа, мм³;

d – диаметр выемки, мм;

R – радиус шара, мм.

Исследования износостойкости образцов при трении скольжения проводили в соответствии со стандартом ASTM G99 по схеме «сфера-диск» (рисунок 2.9) с помощью трибометра Microtest серии МТ. Пара трения: пластины с защитным молибденовым покрытием (пайка и лазерная наплавка) размером не менее 19x19 мм и керамический шарик из Al_2O_3 диаметром 6 мм (контртело). Керамический шарик устанавливается в специальный держатель

перпендикулярно к плоскости пластин и прижимается к вращающемуся образцу. Режим износа: скорость вращения образцов 200 об/мин, нагрузка 10 Н, путь трения 94 м. В процессе исследования постоянно регистрировались значения коэффициента трения.

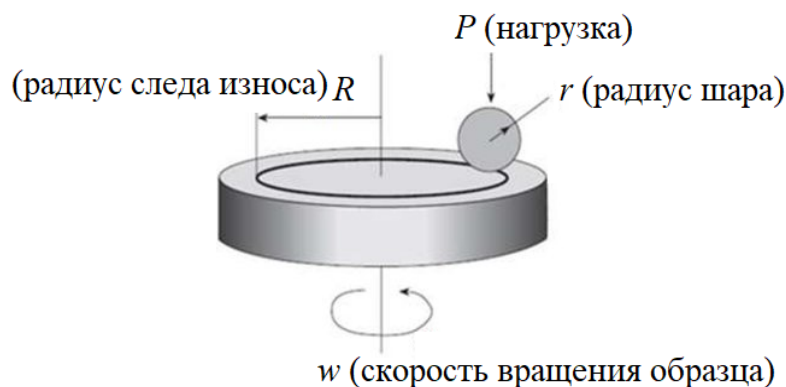


Рисунок 2.9 – Схема испытаний «сфера-диск» при трении скольжения

Величину износа определяли с помощью измерения соответствующих линейных размеров пары трения до и после испытания. Для правильной оценки потери объема анализировали профили треков износа с помощью трехмерного профилометра поверхности (Taylor-Hobson Iy Surf), который отображает морфологию поверхности путем механического контакта иглы с образцом с шагом 0,01 мкм и шагом сканирования со скоростью 0,1 мм/с. Профилометр использовался для определения трехмерных топографических карт поверхности и оценки объемов дорожек. Величину износа вычисляли по формуле:

$$W = V / F_N S \quad (2.2)$$

где V – потеря объема после испытаний, мм³;

F_N – приложенная нагрузка, Н;

S – путь скольжения, м.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

1. В качестве исходных порошковых материалов для исследований коаксиальной лазерной наплавки выбраны отечественные молибденовые порошки марок ПМС-М99,9 и ПМ-М. Определены физические свойства и химический состав выбранных порошков. Описана методика гранулометрического анализа молибденовых порошков.

2. Выбраны отечественные установки для коаксиальной лазерной наплавки. Определены недостатки и преимущества оборудования, используемого для исследований коаксиальной лазерной наплавки молибденового порошка на литую сталь.

3. Предложена методика проведения полного факторного эксперимента для определения рациональных режимов коаксиальной лазерной наплавки одиночных валиков порошка молибдена на литую углеродистую сталь.

4. Определены методики исследования износостойкости функциональных покрытий, изготовленных традиционной технологией (пайкой) и лазерной наплавкой.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОАКСИАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ И ТРАДИЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ (ПАЙКИ)

3.1 Исследование процесса коаксиальной лазерной наплавки молибденового порошка на литую углеродистую сталь

3.1.1 Анализ порошковых материалов

Исследовали молибденовые порошки марок ПМ-М и ПМС-М99,9. Порошок марки ПМ-М имеет осколочную форму. Порошки осколочной формы не регламентированы нормативной документацией для аддитивных технологических процессов. В данном случае рассматривали возможность использования данного порошка для лазерной наплавки в связи с тем, что с экономической точки зрения порошок ПМ-М значительно дешевле порошка сферической формы ПМС-М99,9.

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

Каждая точка на кривой соответствует сумме фракций меньше определенного диаметра. Гистограмма распределения частиц порошка демонстрирует процентное содержание частиц определенного размера. В данном случае распределение размеров частиц порошка описывается законом нормального распределения Гаусса [90].

В результате анализа построенных интегральной и дифференциальной кривых распределения частиц порошка марки ПМ-М по размерам (рисунок 3.1), 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 %. Размер частиц порошка менее 25 мкм составляет 5,94 %, а размер частиц порошка свыше 100 мкм составляет 6,12 % от суммарного содержания частиц.

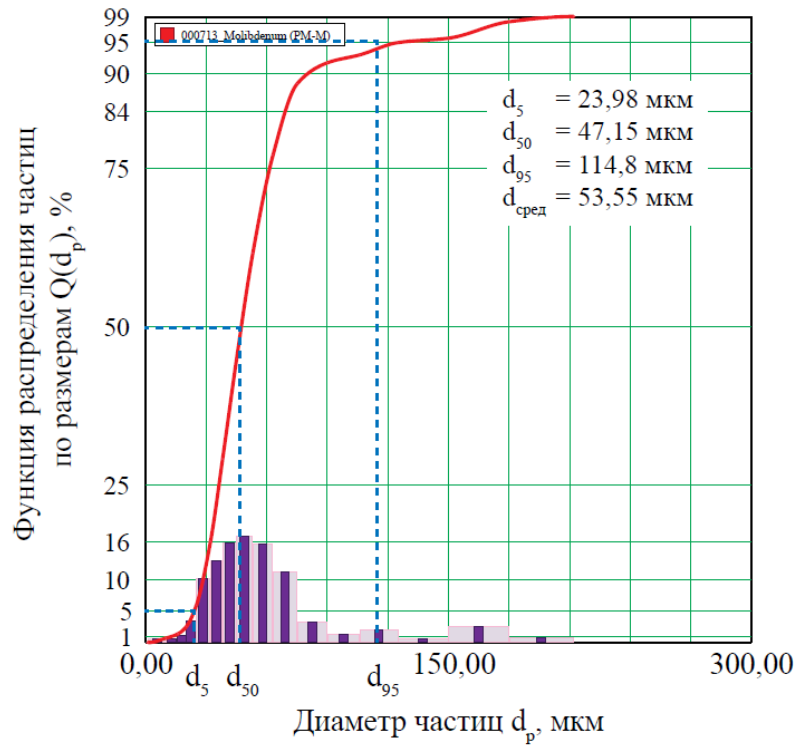


Рисунок 3.1 – Интегральная кривая и гистограмма распределения частиц по размерам порошка марки ПМ-М

На рисунке 3.2 представлена морфология поверхности частиц порошка марки ПМ-М.

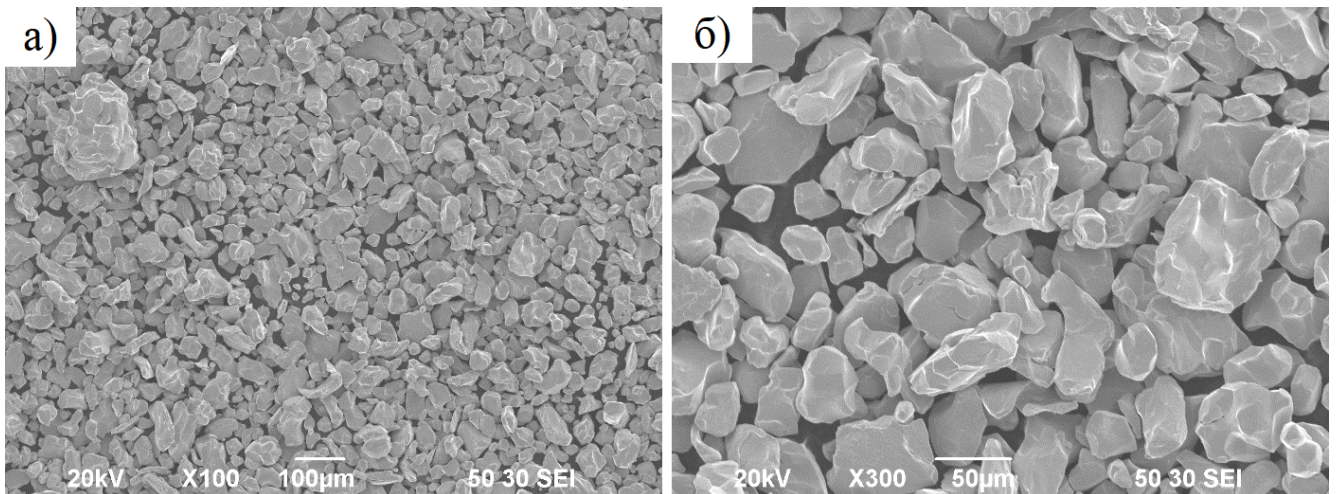


Рисунок 3.2 – Морфология поверхности частиц порошка марки ПМ-М при увеличении $\times 100$ (а), $\times 300$ (б)

Анализ полученных данных показывает, что порошок марки ПМ-М имеет отклонения по размерам фракции, это не позволяет в достаточной мере фокусировать поток и затрудняет транспортировку порошка [91].

В результате анализа построенных интегральной и дифференциальной кривых распределения частиц порошка марки ПМС-М99,9 по размерам (рисунок 3.3), установлено, что средний размер частиц порошка марки ПМС-М99,9 составляет $d_{\text{сред}} = 76,79$ мкм, а суммарное содержание частиц, не соответствующее размеру фракции (от 40 до 100 мкм) составляет 9,75 %.

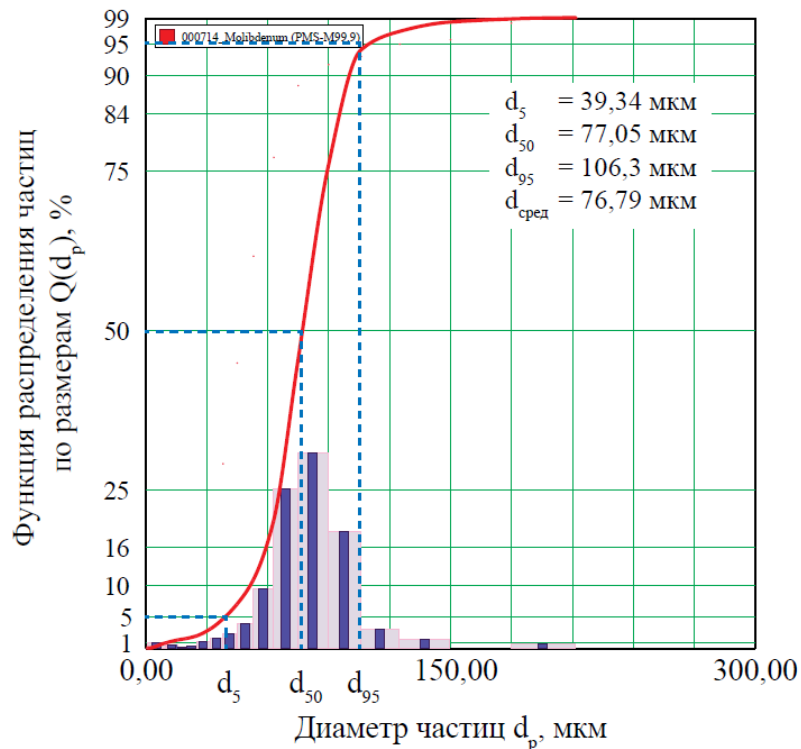


Рисунок 3.3 – Интегральная кривая и гистограмма распределения частиц по размерам порошка марки ПМС-М99,9

Частицы порошка марки ПМС-М99,9 имеют сферическую форму и обладают высоким показателем сферичности более 90 %, что положительно влияет на процесс лазерной наплавки. На рисунке 3.4 представлена морфология поверхности частиц порошка марки ПМС-М99,9.

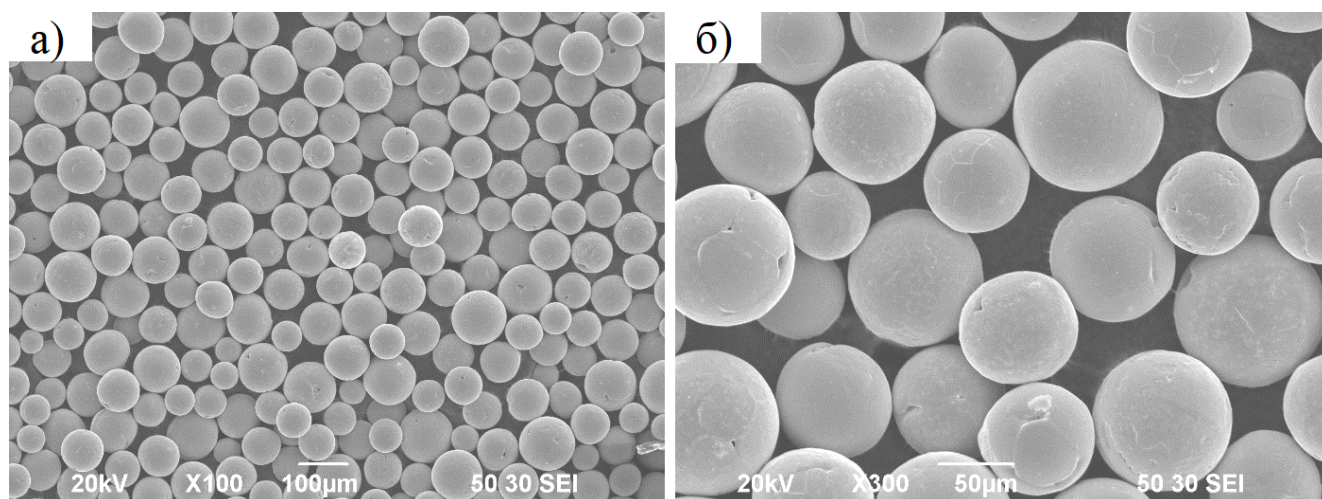


Рисунок 3.4 – Морфология поверхности частиц порошка марки ПМС-М99,9 при увеличении $\times 100$ (а), $\times 300$ (б)

Анализ полученных данных показывает, что порошок марки ПМС-М99,9 полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к металлопорошковым материалам для аддитивной лазерной наплавки.

3.1.2 Разработка регрессионной зависимости режимов коаксиальной лазерной наплавки одиночных валиков

Математическое моделирование (регрессионный анализ) позволяет провести теоретический выбор основных параметров процесса коаксиальной лазерной наплавки. Варьируемые параметры, влияющие на параметр оптимизации: мощность лазерного излучения (P , Вт), скорость сканирования (V , мм/мин) и расход порошка ($F_{\text{пор}}$, г/мин). Параметр оптимизации – микротвердость одиночных валиков, полученных коаксиальной лазерной наплавкой молибденового порошка.

В таблице 3.1 приведены значения уровней факторов и интервалов варьирования.

Таблица 3.1 – Значения уровней факторов и интервалов варьирования

Показатель	Мощность лазерного излучения P, Вт		Скорость сканирования V, мм/мин		Расход порошка F _{пор} , г/мин	
	x ₁		x ₂		x ₃	
	Значение	Код значения	Значение	Код значения	Значение	Код значения
Нижний уровень	360	-1	300	-1	2	-1
Верхний уровень	500	+1	600	+1	6	+1

Матрица планирования полного факторного эксперимента и результаты экспериментов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Матрица планирования полного факторного эксперимента

№ опыта	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	x ₁ x ₂ x ₃	Y _{k эксп} , HV
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	503
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	288
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	326
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	303
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	502
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	259
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	313
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	591

Проведен расчет коэффициентов уравнения регрессии. Определена значимость коэффициентов получившегося уравнения регрессии по критерию Стьюдента. Также проверена адекватность модели по критерию Фишера. В таблице 3.3 приведен алгоритм определения уравнения регрессии и его проверка с указанием формул, и результатов расчета.

Таблица 3.3 – Алгоритм определения уравнения регрессии и его проверки

№	Формула расчета и описание	Результаты расчета
1	<p>Уравнение регрессии в общем виде для полного факторного эксперимента представляется выражениями:</p> $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (3.1)$ $\text{или } y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{j,j=1 \\ j < i}}^n b_{ji} x_j x_i + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (3.2)$ <p>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.</p>	
2	<p>Свободный член (b_0) уравнения (3.2) вычисляется по формуле:</p> $b_0 = \frac{\sum_{k=1}^N Y_{k \text{ эксп}}}{N} \quad (3.3)$ <p>где $Y_{k \text{ эксп}}$ – параметр оптимизации экспериментальный; N – число опытов; k – номер опыта.</p>	$b_0 = 385,625$
3	<p>Вычисление коэффициентов уравнения, характеризующих линейные эффекты определяются по формуле:</p> $b_i = \frac{\sum_{k=1}^N x_i Y_{k \text{ эксп}}}{N} \quad (3.4)$ <p>где x_i – фактор эксперимента.</p>	$b_1 = -25,375$ $b_2 = -2,375$ $b_3 = 30,625$

Продолжение таблицы 3.3

№	Формула расчета и описание	Результаты расчета
4	<p>Определение коэффициентов уравнения, характеризующих эффекты взаимодействия b_{ji} вычисляются по формуле:</p> $b_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^N x_j x_i Y_{k \text{ эксп}}}{N} \quad (3.5)$ <p>где i и j – номера факторов эксперимента.</p>	$b_{12} = 89,125$ $b_{13} = 34,125$ $b_{23} = 38,125$
5	<p>Определение коэффициентов уравнения, характеризующих эффекты тройного взаимодействия b_{123} вычисляются по формуле:</p> $b_{123} = \frac{\sum_{k=1}^N (x_1 x_2 x_3)_i Y_{k \text{ эксп}}}{N} \quad (3.6)$	$b_{123} = 41,125$
<p>Таким образом, с учетом найденных коэффициентов, получим основное уравнение регрессии:</p> $y = 385,625 - 25,375x_1 - 2,375x_2 + 30,625x_3 + 89,125x_1x_2 + 34,125x_1x_3 + 38,125x_2x_3 + 41,125x_1x_2x_3$		
6	<p>Дисперсию воспроизводимости определим с помощью повторных опытов на одном из режимов. Проведем несколько параллельных опытов для того, чтобы определить разброс значений в данной точке</p> $Y_{41 \text{ эксп}} = 299 \text{ HV}, Y_{42 \text{ эксп}} = 301 \text{ HV}, Y_{43 \text{ эксп}} = 304 \text{ HV}.$ <p>Дисперсия воспроизводимости вычисляется по формуле:</p> $S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Y}_i - Y_i)^2}{m-1} \quad (3.7)$ <p>где m – число повторных опытов ($m=3$); \bar{Y}_i – среднее значение микротвердости.</p>	$S_y^2 = 12,66$

Продолжение таблицы 3.3

№	Формула расчета и описание	Результаты расчета
7	<p>Среднее квадратичное отклонение вычисляется по формуле:</p> $S_y = \sqrt{S_y^2} \quad (3.8)$	$S_y = 3,56$
8	<p>Дисперсия коэффициентов уравнения регрессии вычисляется по формуле:</p> $S_{bi} = \frac{S_y}{r} \quad (3.9)$ <p>где r – количество членов в уравнении регрессии, кроме b_0.</p>	$S_{bi} = 0,51$
9	<p>Для оценки значимости коэффициентов вычислим доверительный интервал для коэффициента по формуле:</p> $\Delta b_i = \pm t S_{bi} \quad (3.10)$ <p>где t – критерий Стьюдента.</p>	$\pm 2,193$
10	<p>Адекватность модели подтверждается по критерию Фишера. Экспериментальное значение F-критерия (критерия Фишера) рассчитывается по формуле:</p> $F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} \quad (3.11)$ <p>где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности модели (остаточная дисперсия);</p> <p>S_y^2 – дисперсия опыта (эксперимента).</p>	$F_{расч} = 17,22$
11	<p>Дисперсия адекватности вычисляется по формуле:</p> $S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta Y^2}{f} = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i\text{ расч}} - \bar{Y}_{i\text{ эксп}})^2}{N - p} \quad (3.12)$ <p>где f – число степеней свободы;</p> <p>p – количество значимых коэффициентов модели;</p> <p>N – количество опытов.</p>	$S_{ад}^2 = 218$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии определяется следующим образом: если абсолютная величина коэффициента регрессии больше доверительного интервала – коэффициент значим, все незначимые коэффициенты могут быть исключены из модели, при этом значительно не влияя на модель в целом.

Табличное значение критерия Фишера ($F_{табл} = 18,51$) выше расчетной величины ($F_{расч} = 17,22$) это означает, что полученная модель адекватна.

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 3.5) процесса коаксиальной лазерной наплавки единичных валиков, с помощью которых можно определить значение микротвердости в любой точке факторного пространства.

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, ширина, высота), а также качество валиков.

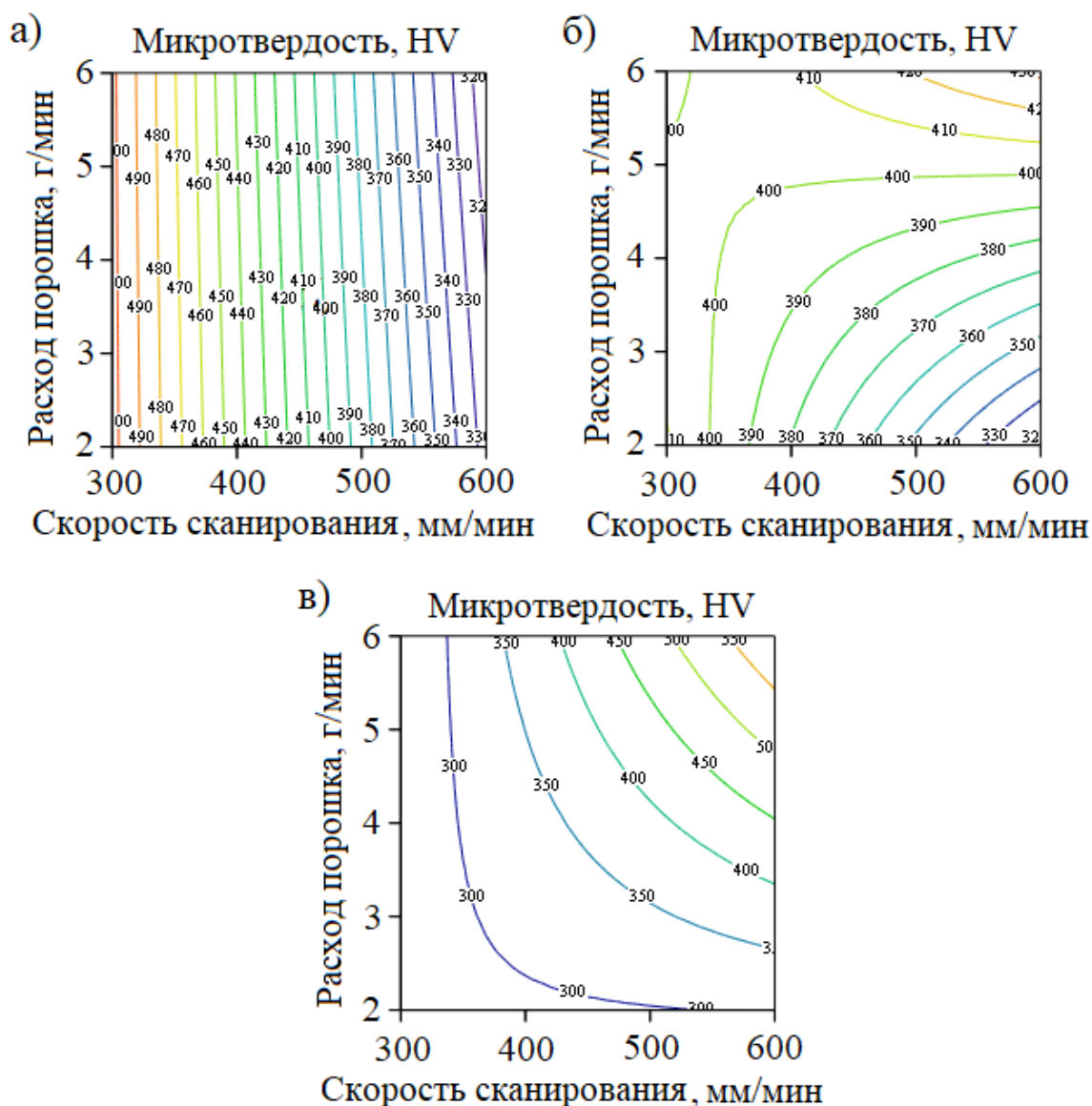


Рисунок 3.5 – Технологические карты процесса коаксиальной лазерной наплавки единичных валиков при мощности лазерного излучения:

360 Вт (а), 420 Вт (б), 500 Вт (в)

3.1.3 Разработка режимов лазерной наплавки одиночных 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 ($F_{\text{нг}}=4$ 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.

Стабильный коаксиальный поток сферического порошка (фракции от 40 до 100 мкм) может быть получен при расходе несущего газа не менее $F_{нг}=4$ л/мин. Эффективная защита зоны расплава при наплавке, без угрозы деформирования обеспечена при расходе защитного газа $F_{зг}=10$ л/мин.

На рисунке 3.6 изображены внешний вид и поперечное сечение сформированных одиночных валиков при варьированных скоростях сканирования от 300 до 700 мм/мин.

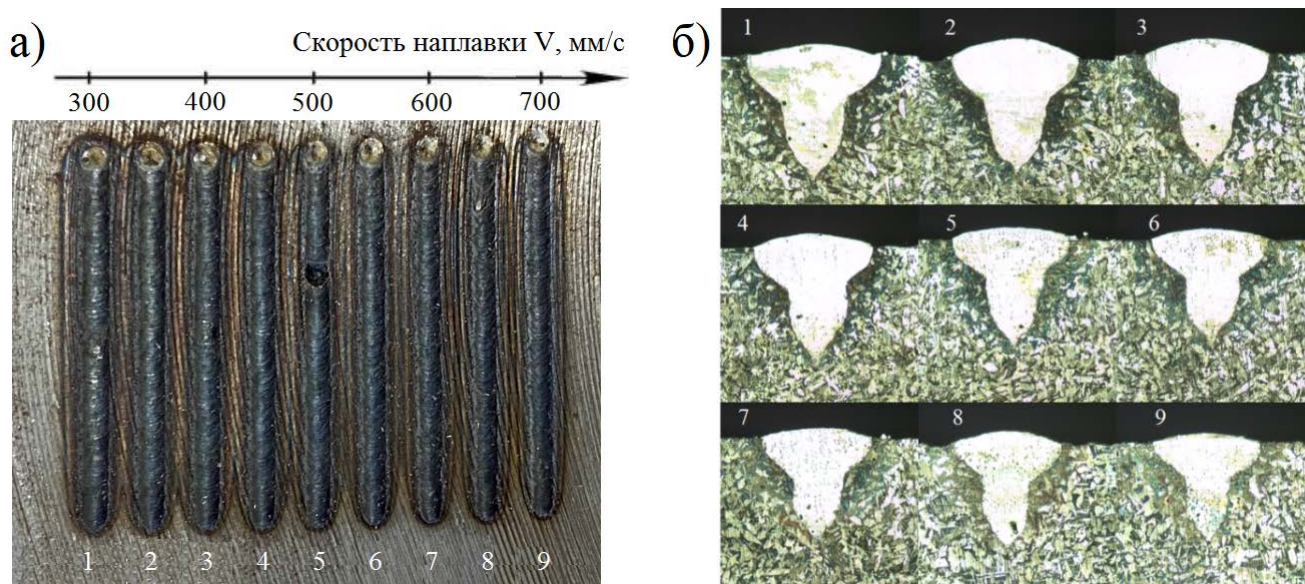


Рисунок 3.6 – Внешний вид (а) и поперечное сечение одиночных валиков (б) при различных скоростях сканирования

В качестве дополнительного анализа для определения рациональных режимов наплавки, была измерена твердость на поперечном сечении единичных треков (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Твердость (HV) в зависимости от скорости сканирования

Номер трека	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Скорость сканирования, мм/мин	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Твердость, HV	430	428	436	421	425	418	423	421	426

При анализе внешнего вида поперечного сечения полученных единичных треков и их геометрических характеристик: ширина, высота и глубина проплавления, а также значений твердости выбрана скорость сканирования $V=400$ мм/мин.

Для расширения возможностей использования разработанных режимов на установках разных производителей, определение рациональных режимов наплавки одиночных валиков продолжили на установке КЛП 400.

Была проведена наплавка молибденового порошка марки ПМС-М99,9 с варьируемыми параметрами мощности, скорости сканирования и расхода порошка при постоянном расходе несущего и защитного газа ($F_{\text{нр}}=4$ л/мин, $F_{\text{зг}}=10$ л/мин). Защитная атмосфера – аргон, диаметр пятна лазера 120 мкм. На рисунке 3.7 изображены поперечные сечения одиночных валиков при различных режимах наплавки согласно таблице 3.5.

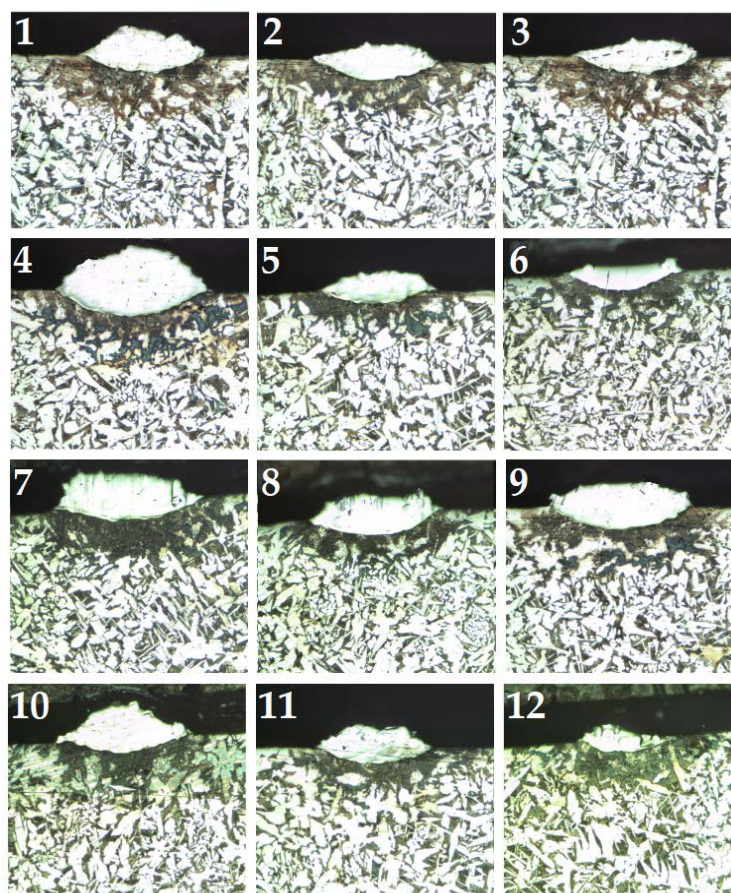


Рисунок 3.7 – Поперечное сечение одиночных валиков при различных режимах наплавки порошка марки ПМС-М99,9

Таблица 3.5 – Твердость в зависимости от режимов наплавки ПМС-М99,9

Номер трека	Мощность лазерного излучения, Вт	Скорость сканирования, мм/мин	Расход порошка, г/мин	Твердость, НV
1	360	200	2	248±3
2	360	300	2	275±12
3	360	400	2	503±10
4	360	200	4	287±5
5	360	300	4	300±15
6	360	400	4	326±16
7	500	200	4	331±8
8	500	300	4	416±24
9	500	400	4	435±11
10	500	200	6	319±26
11	500	300	6	336±15
12	500	400	6	500±30

В наплавленных валиках молибдена при увеличении $\times 1000$ (рисунок 3.8, б) наблюдается дендритная структура, столбчатые дендриты растут от границы зоны плавления к центру расплавленной ванны, т.е. в направлении обратном теплоотводу.

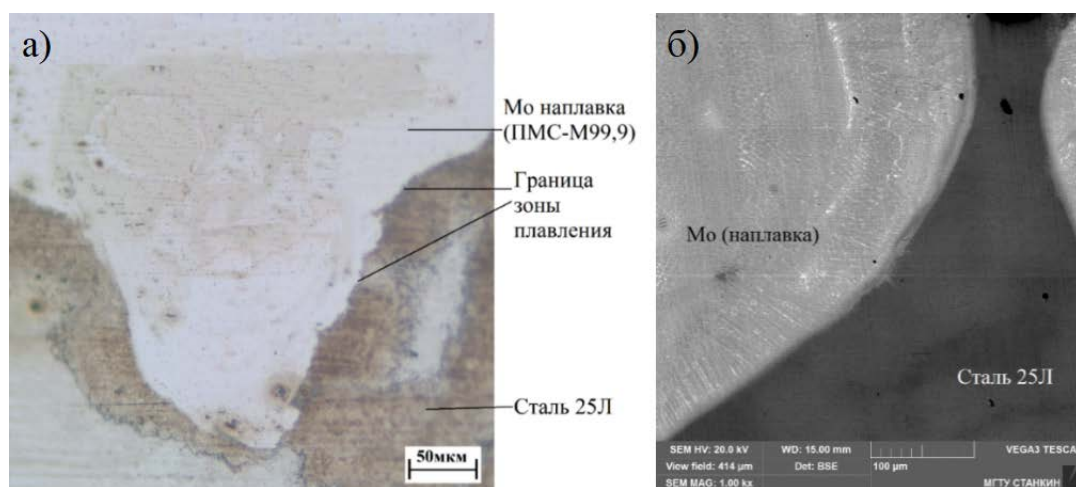


Рисунок 3.8 – Микроструктура поперечного сечения единичного валика: оптическое изображение $\times 500$ (а), электронное $\times 1000$ (б)

На рисунке 3.9 представлена карта распределения основных элементов области границы лазерной наплавки одиночного валика и стальной подложки согласно таблице 3.6.

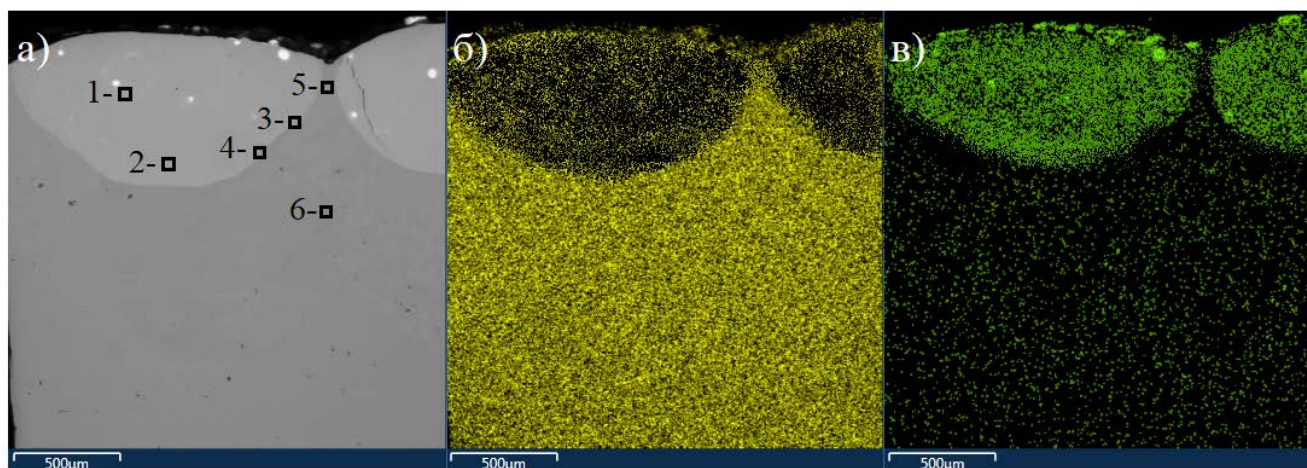


Рисунок 3.9 – Карта распределения основных элементов в области границы лазерной наплавки одиночного валика и стальной подложки, электронное изображение (а), распределение Fe (б) и Mo (в)

Таблица 3.6 – Распределение основных элементов по спектрам

Номер спектра	Элемент, %			
	Fe	Mo	Mn	Si
1	9,28	89,65	0,42	0,65
2	12,7	86,2	0,44	0,66
3	82,21	16,77	0,42	0,6
4	83,55	15,37	0,44	0,64
5	97,4	1,48	0,46	0,66
6	98,38	0,46	0,48	0,68

Анализ концентрации распределения Mo и Fe (рисунок 3.10) 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.

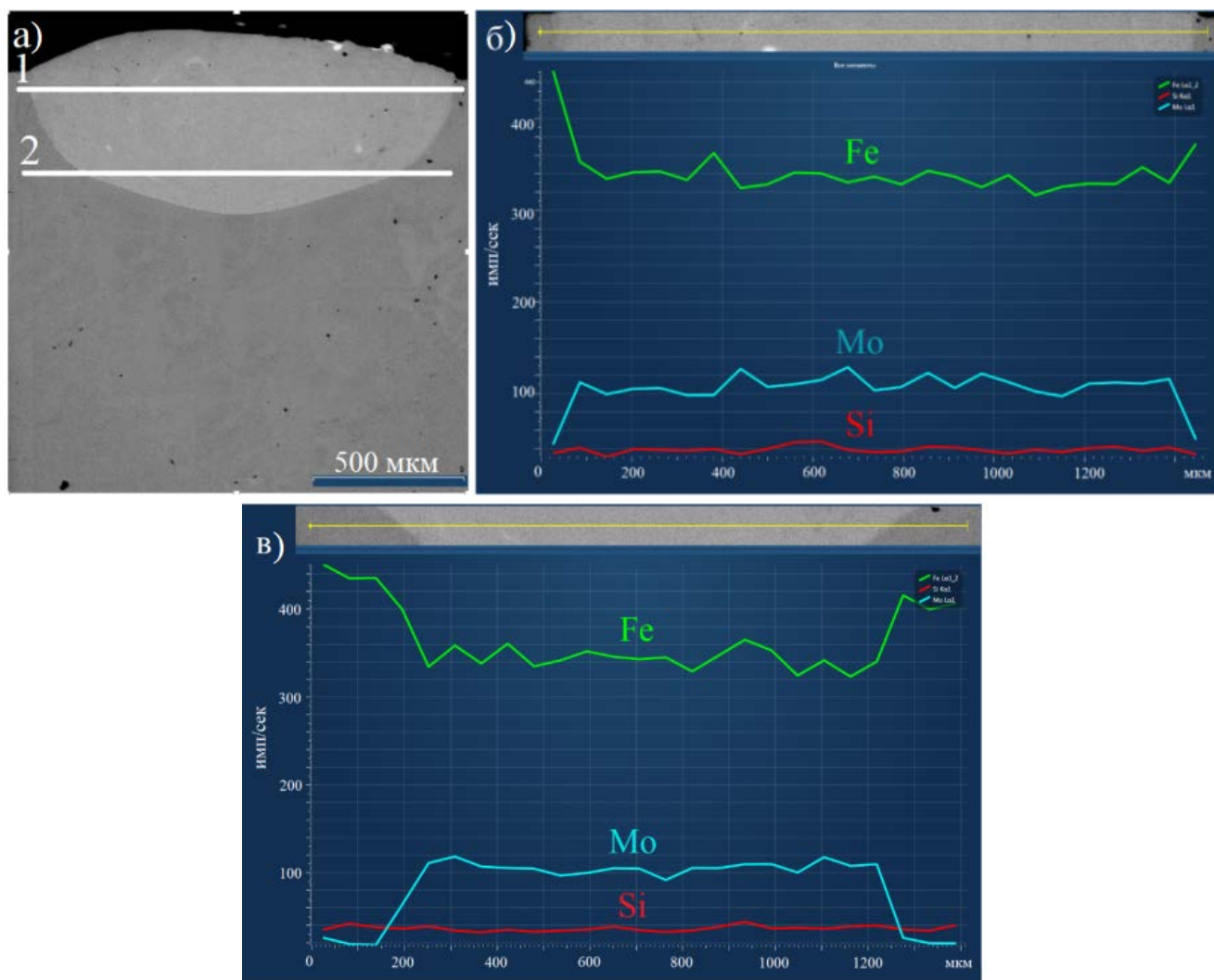


Рисунок 3.10 – Распределение концентрации основных элементов (Mo-Fe) по сечению валика: электронное изображение (а), линия 1 (б), линия 2 (в)

В результате анализа внешнего вида, микроструктуры поперечного сечения полученных единичных треков и их геометрических характеристик (ширина, высота и глубина проплавления), а также значений твердости, определены рациональные режимы лазерной наплавки одиночных валиков молибденового порошка ПМС-М99,9 на литую сталь 25Л: мощность лазерного излучения $P=500$ Вт, скорость сканирования $V=400$ мм/мин, расход порошка $F_{\text{пор}}=4$ г/мин, расход несущего газа $F_{\text{нп}}=4$ 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. На рисунке 3.11

представлены типичные дефекты в поперечном сечении одиночных валиков наплавки порошка ПМ-М.

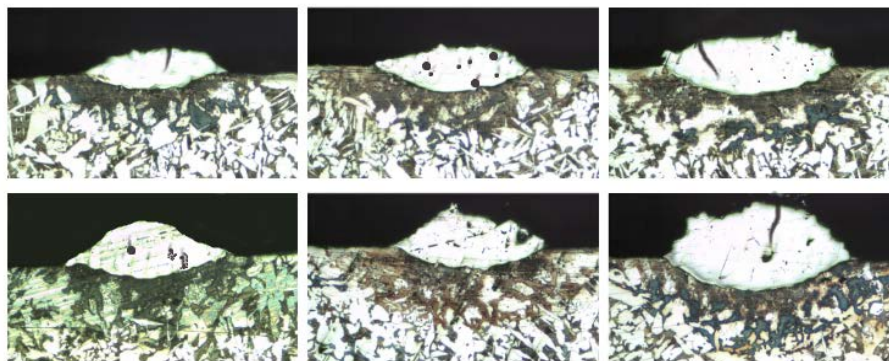


Рисунок 3.11 – Типичные дефекты в поперечном сечении одиночных валиков наплавки порошка ПМ-М

Исследование микроструктуры (рисунок 3.12) полученных слоев трехмерных образцов показало, что на образцах наплавки порошка ПМ-М имеются скопления пор, трещины и микротрещины на границе сталь-молибден.

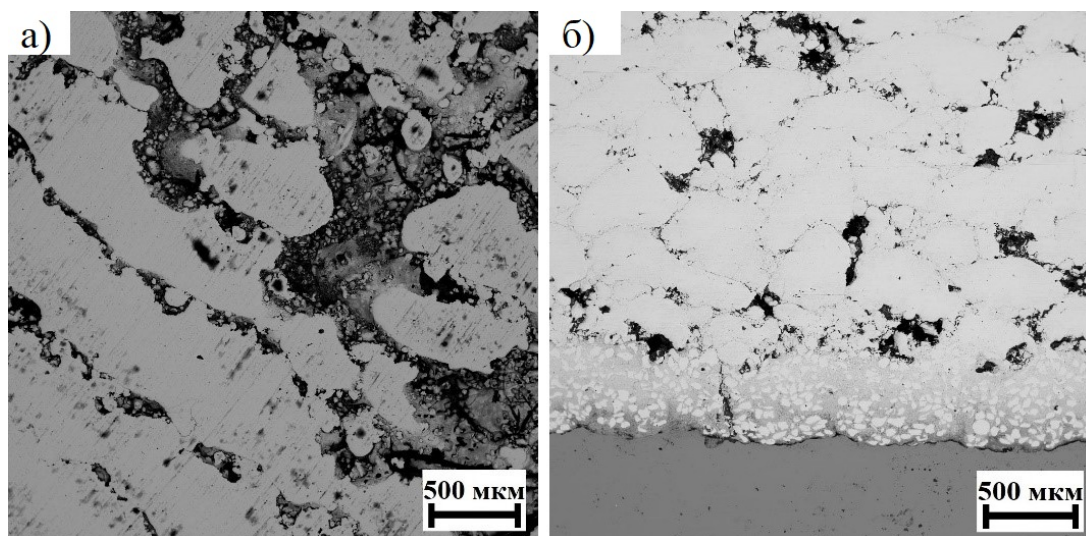


Рисунок 3.12 – Микроструктура слоев трехмерных образцов наплавки порошка ПМ-М (x100): вид сверху (а), поперечное сечение (б)

Варьирование параметров наплавки порошка ПМ-М не привели к улучшению микроструктуры по сравнению с наплавкой порошка марки ПМС-М99,9. Учитывая дефекты в наплавленном слое применять порошок марки ПМ-М для решения задачи по замене вакуумной пайки нецелесообразно.

3.1.4 Разработка режимов лазерной наплавки единичного слоя

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 (рисунок 3.13), 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).

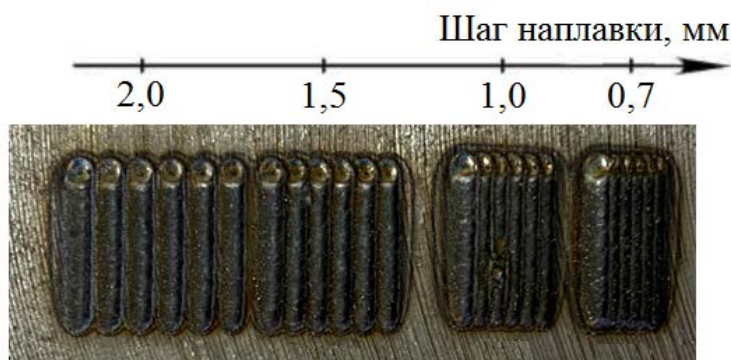


Рисунок 3.13 – Внешний вид единичного слоя в зависимости от шага наплавки, вид сверху

Расстояние между осями двух соседних валиков: 2,0 мм и 1,5 мм является недостаточным для получения монолитного и равномерного слоя.

При шаге наплавки 0,7 мм (рисунок 3.14) первый слой монолитный, но не равномерный. При таком расстоянии между валиками обнаружены дефекты в виде трещин, наиболее распространенный и характерный дефект при наплавке тугоплавких материалов.

Также, при шаге наплавке 0,7 мм необходимо наплавлять слой с большим припуском под механическую обработку, что негативно сказывается на коэффициенте использованного материала (КИМ). Таким образом, шаг наплавки 0,7 мм не обеспечивает качественного слоя.

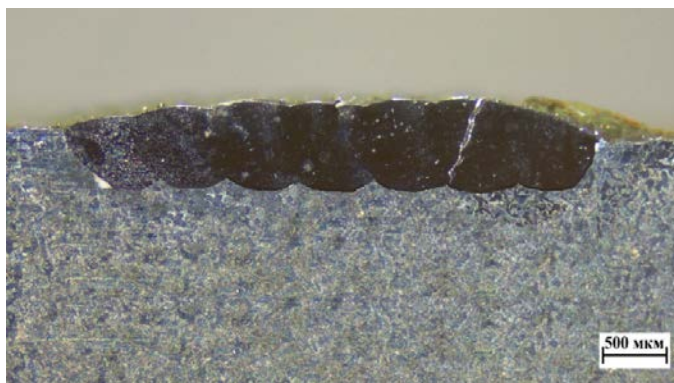


Рисунок 3.14 – Внешний вид поперечного сечения единичного слоя с шагом наплавки 0,7 мм

При шаге наплавки 1,0 мм удалось получить равномерный бездефектный слой (рисунок 3.15).

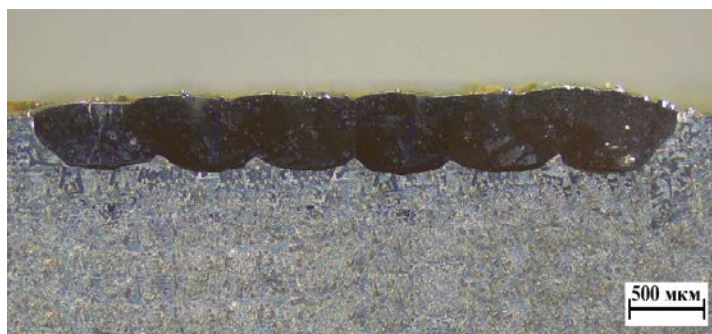


Рисунок 3.15 – Внешний вид поперечного сечения единичного слоя с шагом наплавки 1,0 мм

3.1.5 Разработка режимов лазерной наплавки объемных образцов

Наплавку трехмерных объектов выполняли на установке КЛП 400, толщина наплавляемых функциональных слоев составляла от 4 до 5 мм. Для наплавки использовали порошок ПМС-М99,9.

Для уменьшения анизотропии свойств, проводили изменение направления наплавки на 90° от слоя к слою, тем самым реализуя стратегию сканирования, представленную на рисунке 3.16. Шаг наплавки составляет 1 мм, перемещение сопла по вертикальной оси $\Delta z \approx 0,25$ мм.

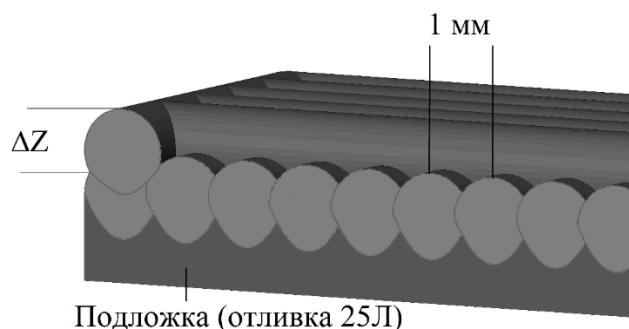


Рисунок 3.16 – Стратегия сканирования наплавки трехмерных образцов

С целью получения более качественных слоев (устранения возможных дефектов в виде пор и трещин), в процессе наплавки порошка ПМС-М99,9 изменяли значения мощности лазерного излучения от слоя к слою: мощность для первого слоя составила 500 Вт, для второго слоя 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 ($F_{нг}=4$ л/мин, $F_{зг}=10$ л/мин). На рисунке 3.17 изображен внешний вид трехмерных образцов наплавки порошка ПМС-М99,9 по режимам, указанным в таблице 3.7.

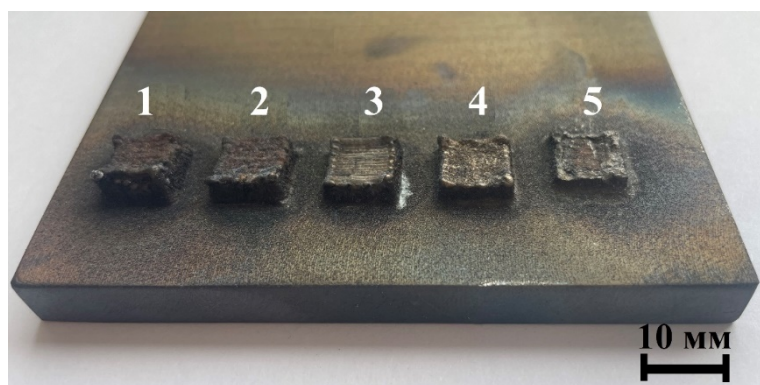


Рисунок 3.17 – Внешний вид трехмерных образцов наплавки

Таблица 3.7 – Варьируемые параметры наплавки трехмерных образцов

Номер образца	Мощность лазерного излучения, Вт	Скорость сканирования, мм/мин	Расход порошка, г/мин
1	Первый слой – 500, второй слой – 900, последующие - 1000	300	6
2		300	4
3		400	6
4		400	4
5	500	400	4

Исследование микроструктуры полученных функциональных слоев показало, что при увеличении мощности лазерного излучения в процессе наплавки по указанным выше значениям, скорости сканирования 400 мм/мин и расходе порошка 4г/мин, получаются качественные покрытия с отсутствием трещин и пор (образец № 4, рисунок 3.18 – 3.19).

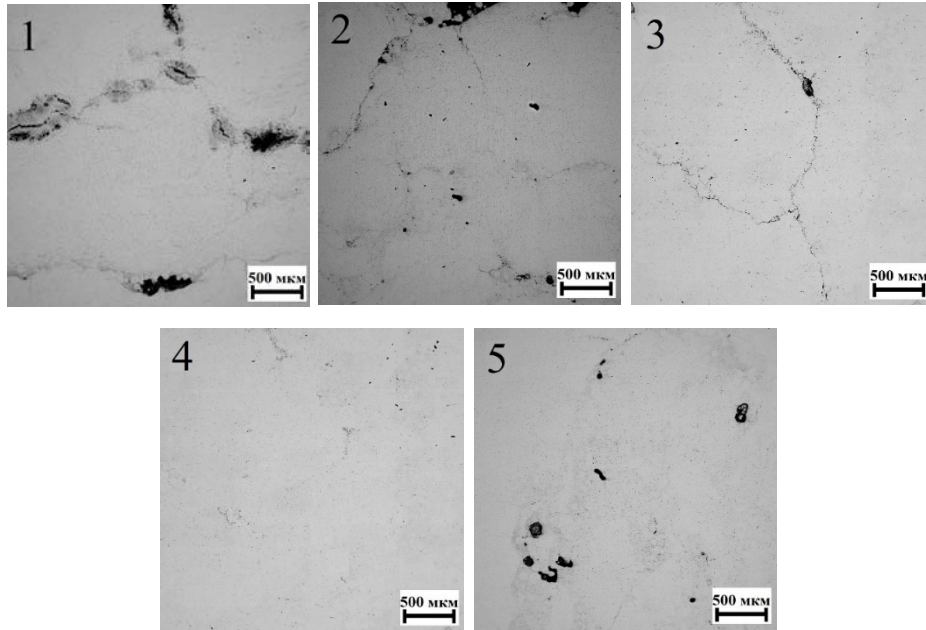


Рисунок 3.18 – Микроструктура функциональных слоев трехмерных образцов наплавки порошка ПМС-М99,9, вид сверху (x100)

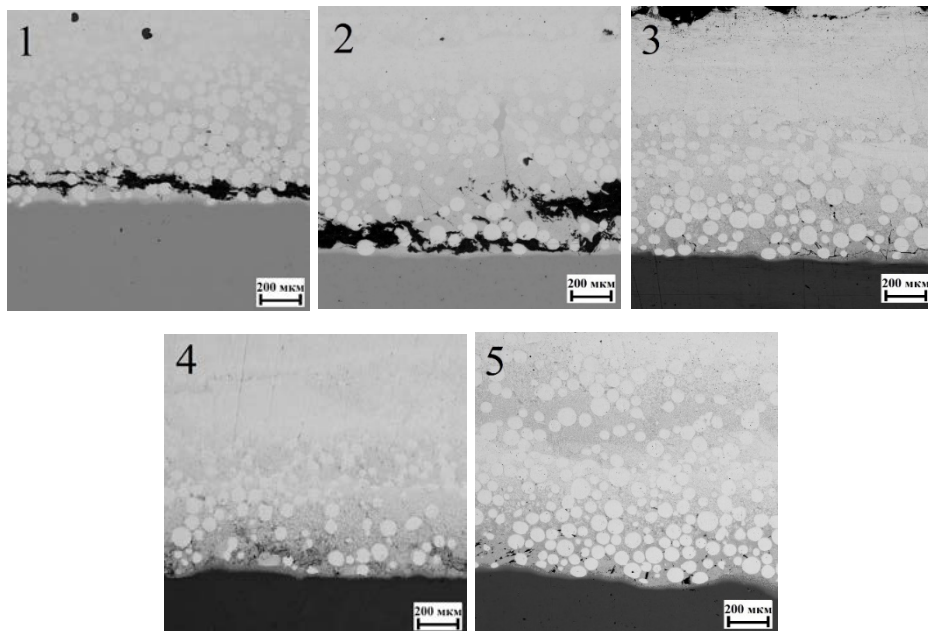


Рисунок 3.19 – Микроструктура поперечного сечения функциональных слоев трехмерных образцов наплавки порошка ПМС-М99,9 (x200)

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 $F_{\text{нр}}=4$ л/мин и защитного газа $F_{\text{зр}}=10$ л/мин, шаг наплавки 1 мм, $\Delta z \approx 0,25$ мм.

При исследовании микроструктуры объемного образца наплавленного порошка ПМС-М99,9 на сталь 25Л 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 3.20 – 3.22), что обеспечивает хорошую адгезию наплавленного слоя к подложке [92, 93].

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 3.21, 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 .

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.

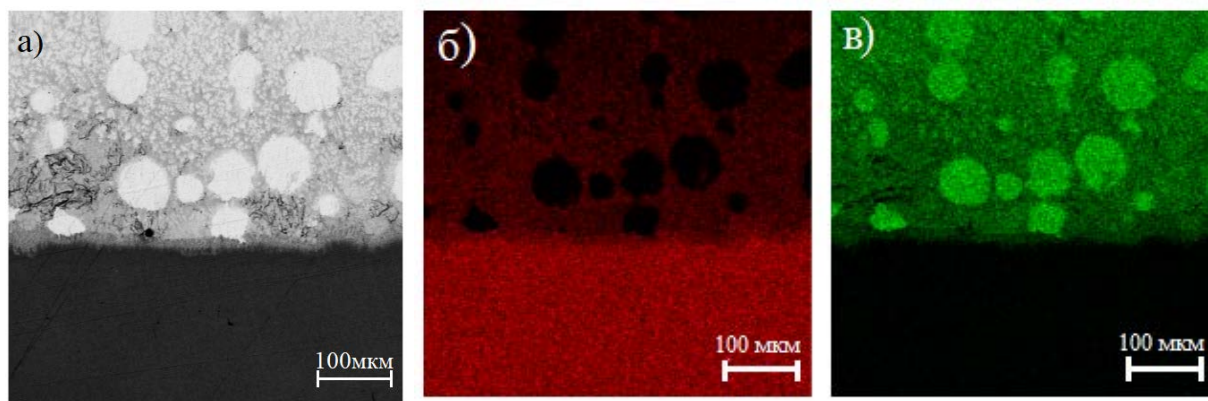


Рисунок 3.20 – Микроструктура наплавленного слоя Мо на сталь 25Л вблизи границы ванны расплава. Электронное изображение (а), карты распределения Fe (б), Мо (в)

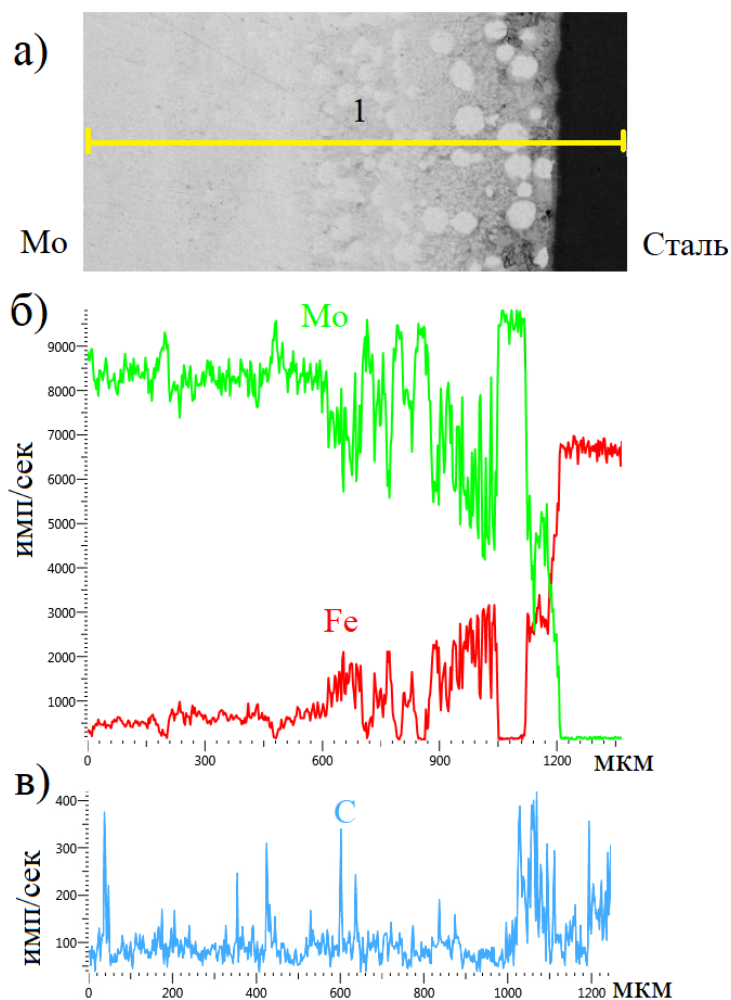


Рисунок 3.21 – Распределение концентрации основных элементов в наплавленном слое по линии 1 (Мо-сталь). Микроструктура наплавленного слоя, электронное изображение (а), распределение Fe и Мо (б), распределение углерода (в)

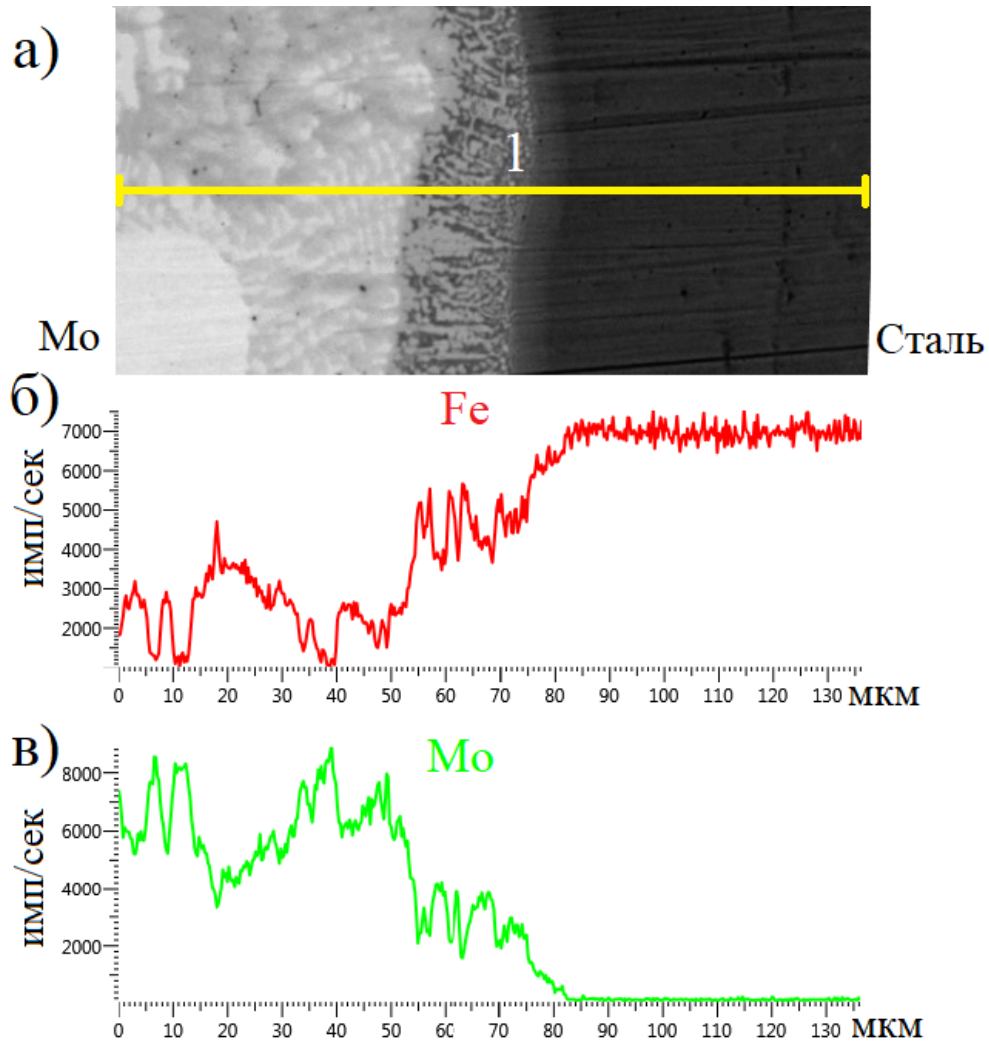


Рисунок 3.22 – Распределение концентрации основных элементов в переходном слое по линии 1 (Мо-сталь). Микроструктура приграничного слоя, электронное изображение (а), распределение Fe (б) и Мо (в)

3.2 Изготовление образцов по традиционной технологии с помощью вакуумной диффузионной пайки

При традиционном способе изготовления биметаллических деталей углеродистая сталь – молибден используется вакуумная диффузионная пайка с применением меди (марки М1) в качестве припоя. Медь в качестве припоя обладает хорошей жидкотекучестью, легко проникает в капиллярные зазоры. Эту особенность меди используют там, где необходимо получить соединение с большой протяженностью паянного шва, более 20 мм [94]. Недостаток

применения меди марки М1, как припоя, является возникновение в соединениях дефектов в виде: газовых пор и кристаллизационных трещин при пайке в окислительной среде, вследствие образования эвтектики Cu-Cu₂O [95]. В данном случае для предотвращения дефектов пайку проводили в вакууме.

Для предотвращения появления окисных пленок применяли механический способ подготовки поверхностей (стального корпуса и молибденовой пластины). С целью гарантированной очистки стального корпуса от загрязнений перед пайкой проводили отжиг в среде вакуума при температуре 1050 °С в течении 30 мин.

Медный припой из ленты М1 изготавливали непосредственно перед пайкой с помощью штампа по конфигурации места пайки.

Все составляющие (стальной литой корпус, молибденовая пластина и медный припой) перед пайкой обезжировали с помощью бензина.

Сборка под пайку осуществлялась с помощью специального приспособления. Пайку проводили в вакуумной электропечи СНВЭ, 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.

3.3 Исследование структуры и состава слоев, полученных традиционным методом с помощью пайки

Микроструктура паяного шва состоит из смеси твердых растворов на основе меди (ϵ -фаза) и феррита (твердый раствор углерода в α -железе) (рисунок 3.23). На границе паяного соединения и молибденовой накладки видна четкая темная линия (не по всей длине).

Результаты микрорентгеноспектрального анализа (рисунок 3.24) зоны паянного соединения показали достаточно большой процент содержания меди (31,6%) в паянном шве.

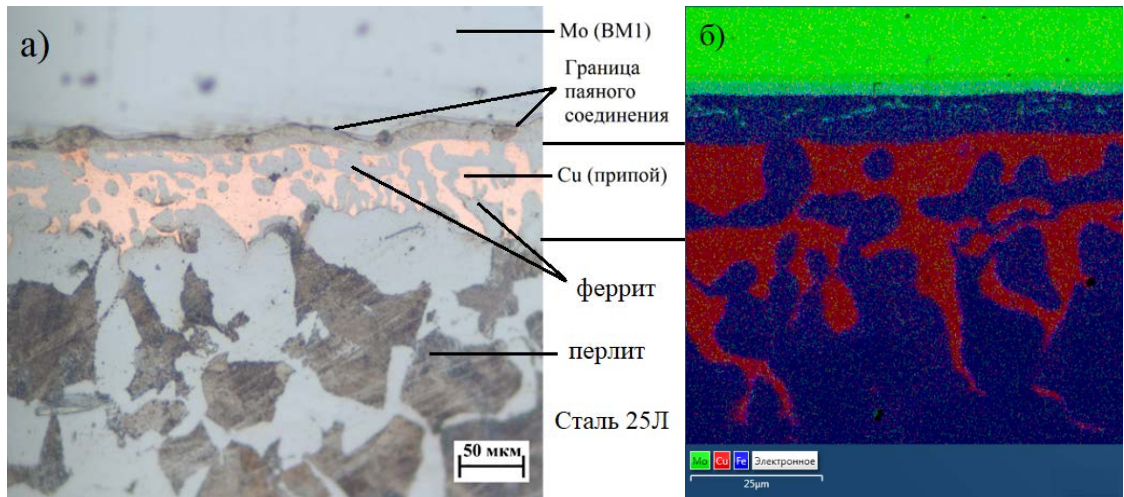


Рисунок 3.23 – Микроструктура шва при вакуумной пайке: оптическое изображение $\times 500$ (а), многослойное изображение основных элементов Мо, Fe, Cu, $\times 5000$ (б)

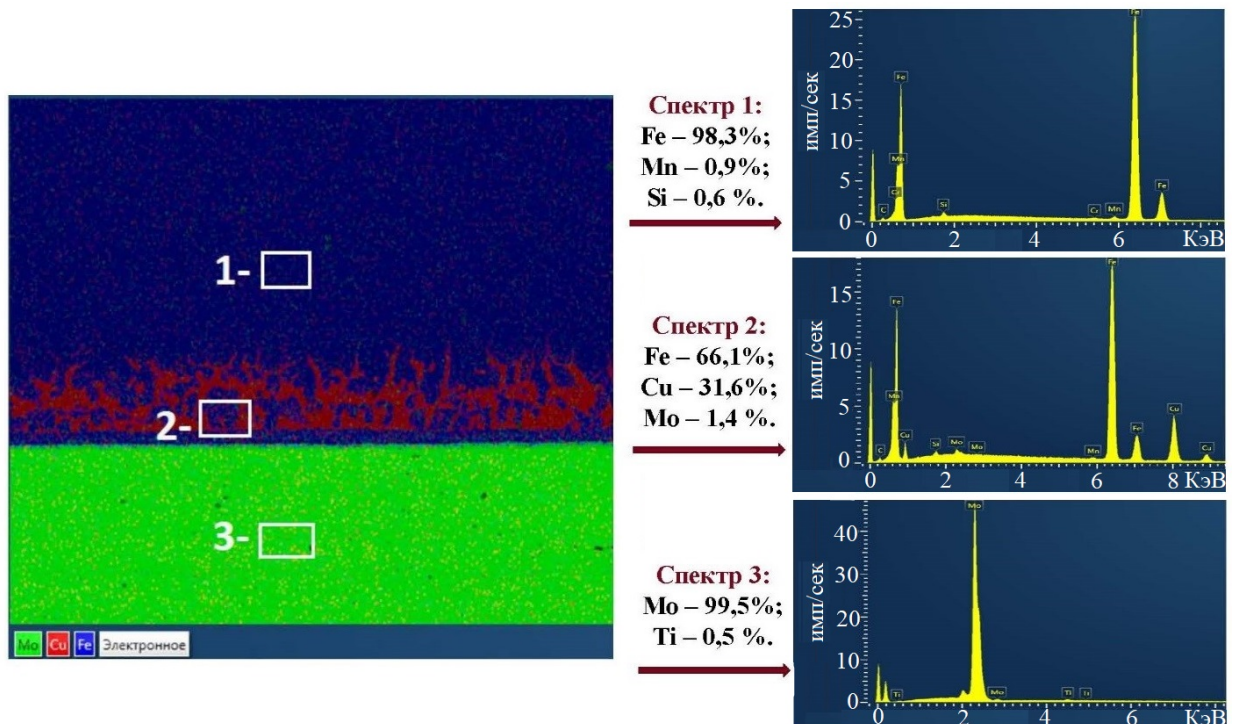


Рисунок 3.24 – Распределение элементов по спектрам в зоне паянного шва

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 зёрнами феррита и перлита в стальной подложке.

Недостатком применения меди в качестве припоя при пайке для изготовления биметаллических деталей углеродистая сталь – молибден работающих при высоких температурах (в продуктах сгорания топлива) является относительно низкая температура плавления медного припоя (1083 °С). Это может привести к разрушению покрытия в процессе эксплуатации, вследствие того, что рабочая температура деталей будет превышать температуру плавления медного припоя.

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.

3.4 Сравнительный анализ механических и эксплуатационных характеристик образцов, полученных с помощью коаксиальной лазерной наплавки и традиционной технологией (пайки)

Сравнительный анализ твердости молибденовой пластины после пайки и наплавленных молибденовых слоев, показал преимущество лазерной наплавки (рисунок 3.25, таблица 3.8). Твердость молибденового слоя, полученного лазерной наплавкой выше в ~2,4 раза.

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 3.8 – Твердость и плотность в зависимости от технологии нанесения

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

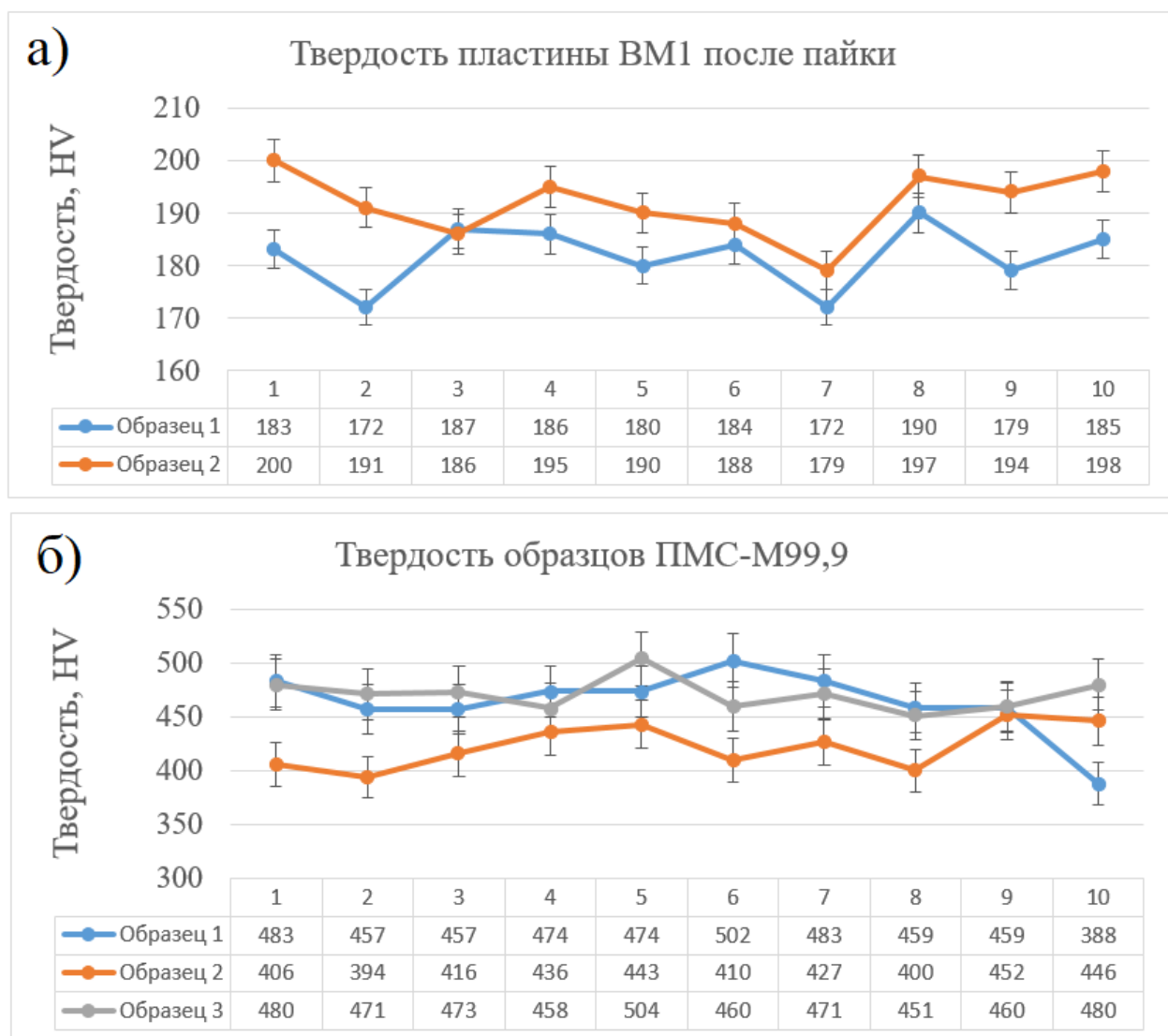


Рисунок 3.25 – Твердость образцов после пайки (а) и наплавки (б)

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.

В результате проведения сравнительных исследований износостойкости при фреттинге установлено, что коэффициент трения покрытий практически одинаковый и составляет $\sim 0,25$ (рисунок 3.26).

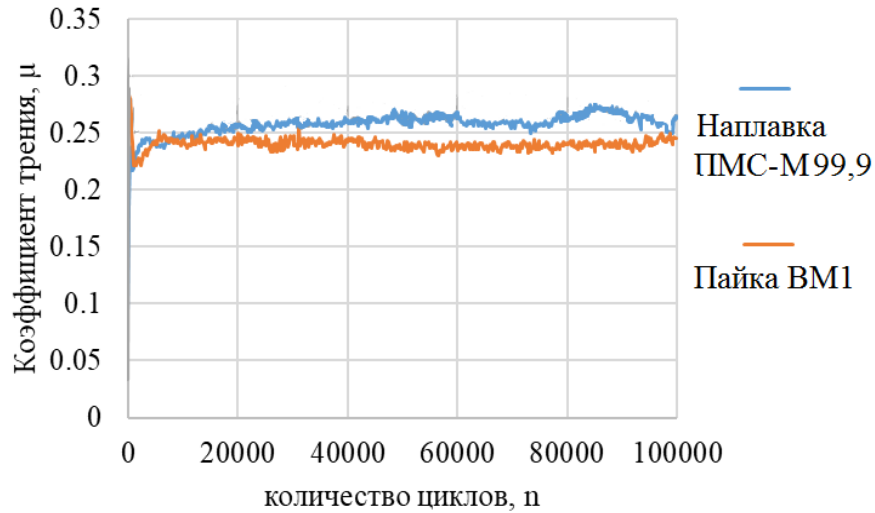


Рисунок 3.26 – Зависимость коэффициентов трения от количества циклов

Результаты деструктивных процессов в пятне контакта номинально неподвижного фрикционного соединения при изнашивании в условиях фреттинга (частота 20 Гц, нагрузка 5 Н, количество циклов 10^5) и объем износа представлены на рисунке 3.27 – 3.28 и таблице 3.9.

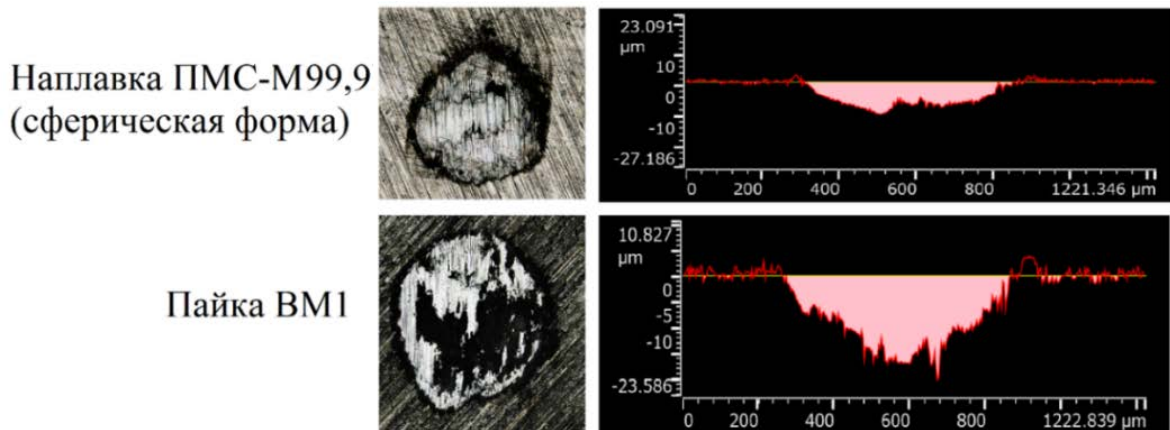


Рисунок 3.27 – Внешний вид пятна контакта и профилограмма объема износа молибденовых слоев при изнашивании в условиях фреттинга

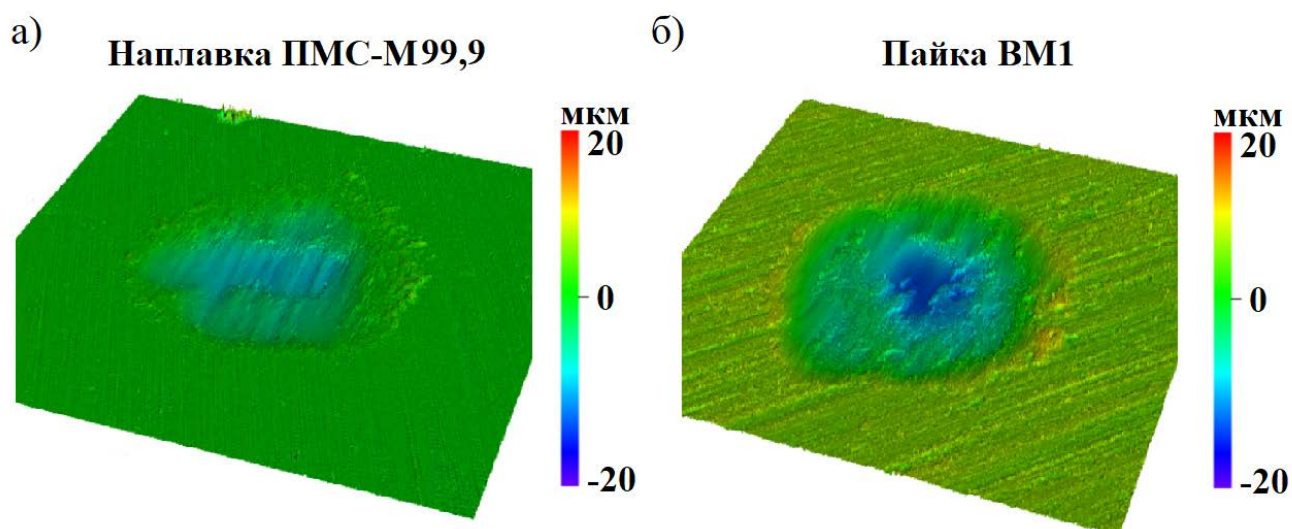


Рисунок 3.28 – 3Д-профилограммы износа в условиях фреттинга образцов:
наплавки ПМС-М99,9 (а) и пайки ВМ1 (б)

Таблица 3.9 – Величина объемного износа молибденовых слоев

№ испытания	Наплавка ПМС-М99,9	Пайка ВМ1
1	1218335	2396864
2	1313380	2746736
3	1237625	2495547

Установлено, что на образцах, изготовленных лазерной наплавкой сферичного 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.

Сравнительные испытания износостойкости в условиях абразивного износа проводили на образцах двух видов, изготовленных по традиционной технологии (пайка) и с помощью лазерной наплавки порошка ПМС-М99,9. Результаты исследования приведены на рисунке 3.29 – 3.31 и таблице 3.10.

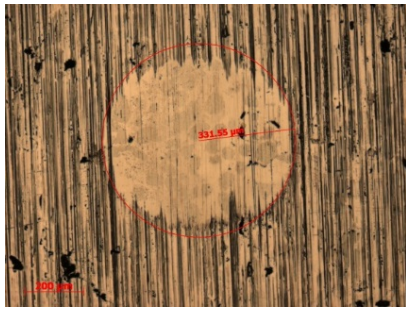
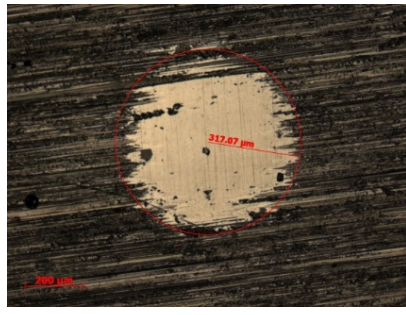
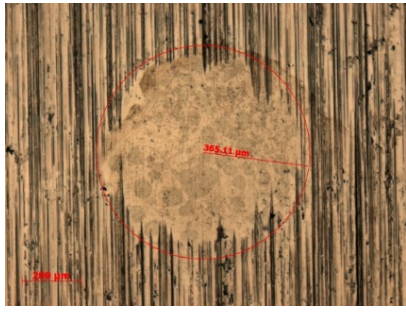
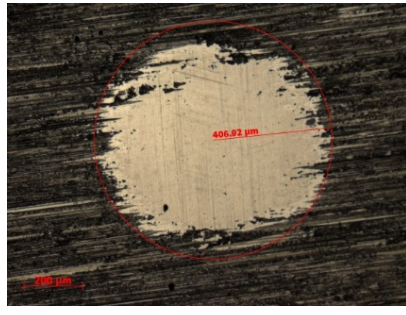
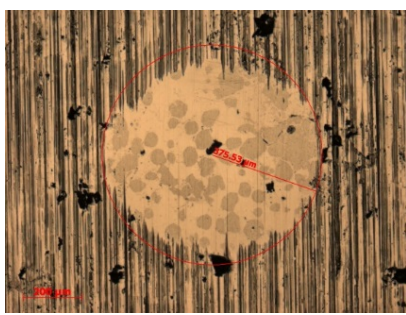
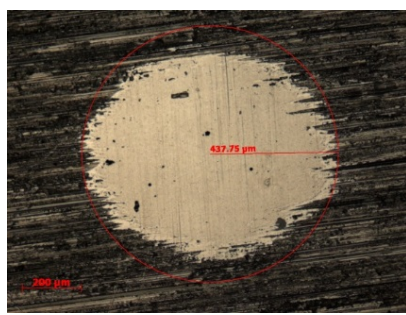
Время износа	Наплавка ПМС-М99,9	Пайка ВМ1
5 мин		
10 мин		
15 мин		

Рисунок 3.29 – Развитие деструктивных процессов в пятне контакта при абразивном износе в зависимости от времени износа

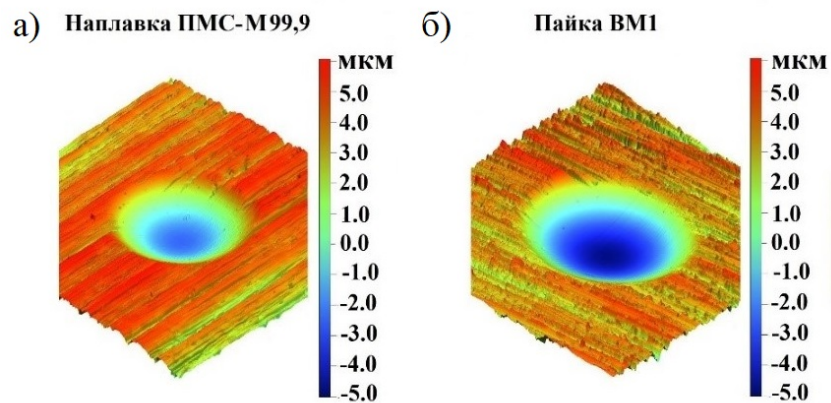


Рисунок 3.30 – 3Д-профилограммы абразивного износа ($t = 15$ мин) образцов: наплавки ПМС-М99,9 (а) и пайки ВМ1 (б)

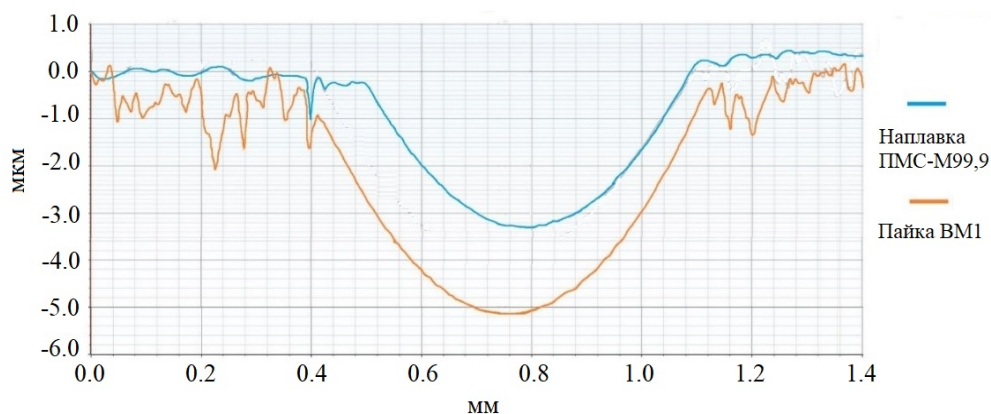


Рисунок 3.31 – Профилограммы абразивного износа образцов ($t = 15$ мин)

Таблица 3.10 – 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

Результаты исследования абразивного износа образцов показали, что объем износа образца, изготовленного традиционной технологией (пайка ВМ1), выше по сравнению с образцом, изготовленным лазерной наплавкой порошка ПМС-М99,9.

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

Исследования 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 3.32) показывает, что коэффициент трения у образца наплавки ПМС-99,9М ниже, чем у припаянной молибденовой пластины ВМ1 (~0,47 и ~0,67 соответственно). Период приработки примерно одинаков у обоих образцов.

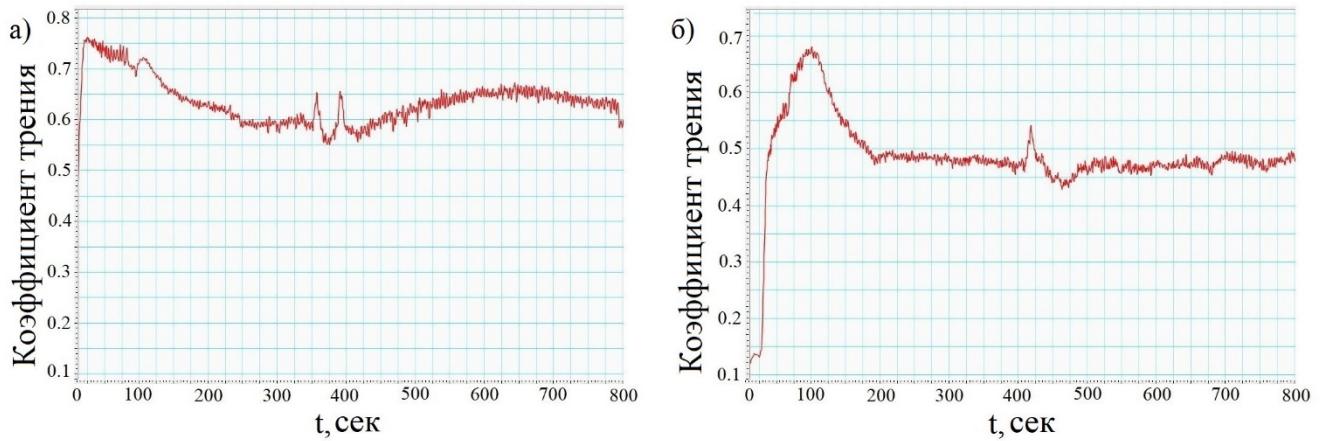


Рисунок. 3.32 – Зависимость коэффициента трения от времени работы: припаянной молибденовой пластины VM1 (а), наплавки ПМС-М99,9 (б)

Из графиков, представленных на рисунке 3.33 видно, что у образцов наплавки ПМС-М99,9 износ после периода приработки несколько ниже, чем у припаянной молибденовой пластины VM1, период приработки также значительно короче.

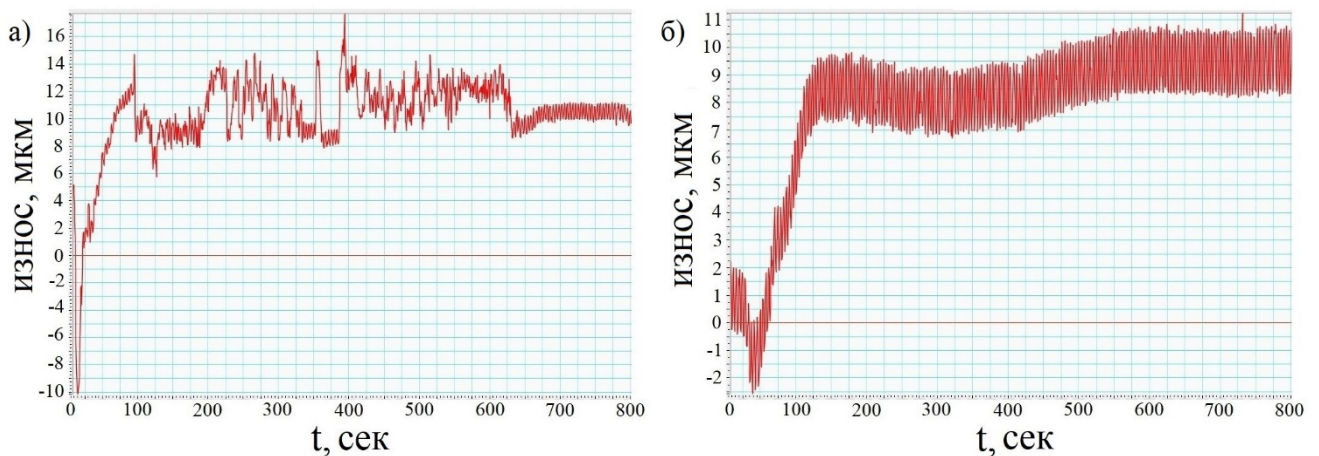


Рисунок 3.33 – Зависимость изнашивания от времени работы: припаянной молибденовой пластины VM1 (а), наплавки ПМС-М99,9 (б)

На рисунке 3.34 показана топография поверхности трехмерных дорожек износа для припаянной пластины VM1 и наплавленного слоя из порошка ПМС-М99,9. Исходя из трехмерной топографии поверхности следов износа были оценены объемы износа пластины VM1 и наплавленного слоя ПМС-М99,9 ($4,9245 \times 10^{-4}$ мм³/Нм и $3,0529 \times 10^{-4}$ мм³/Нм соответственно).

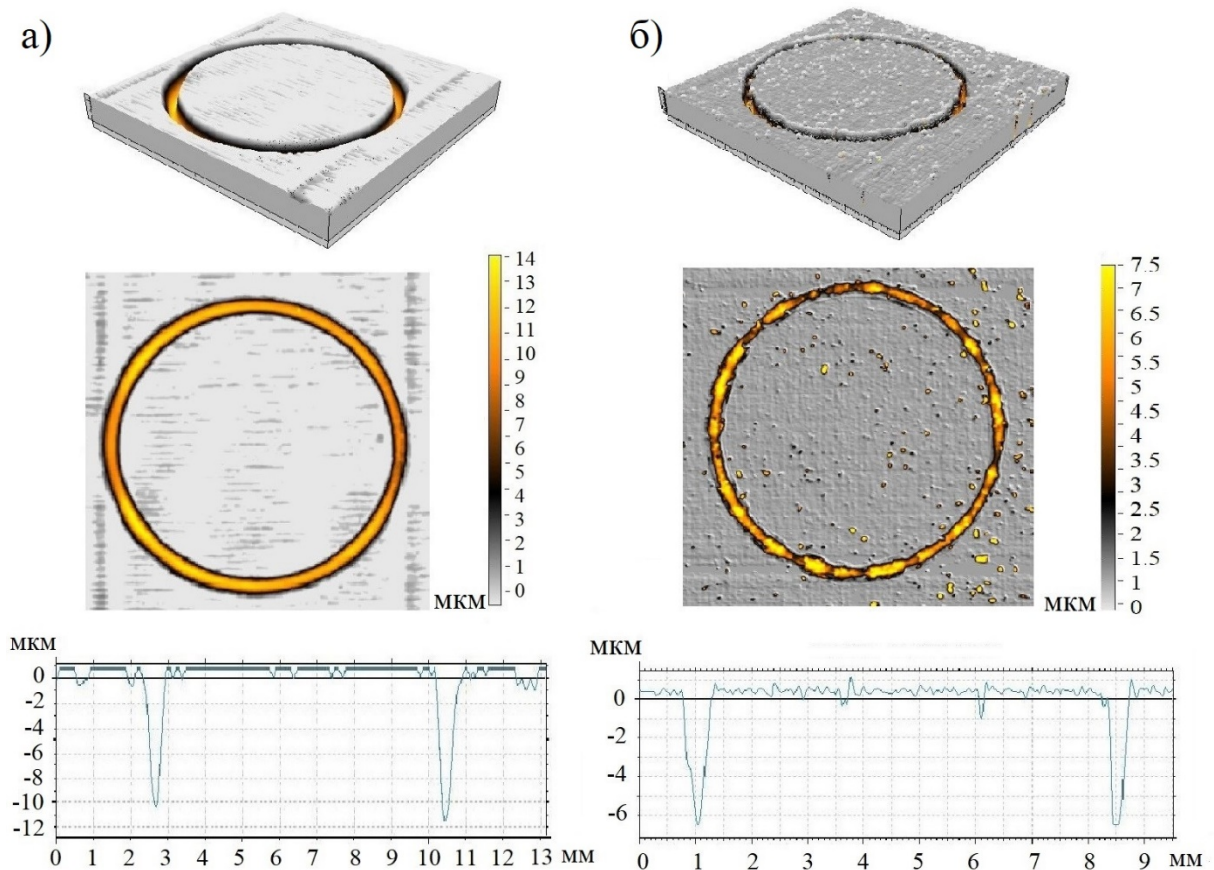


Рисунок 3.34 – Трехмерные топографии и вид сверху окончательных следов износа, соответствующие припаянной пластине VM1 (а) и наплавленного слоя порошка ПМС-М99,9 (б). Глубина износа показана на цветной шкале.

Исследования показали, что износ наплавленного слоя ПМС-М99,9 ниже, чем припаянной пластины VM1 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, функциональные слои, полученные с помощью лазерной наплавки сферического порошка ПМС-М99,9, позволят обеспечить лучшие эксплуатационные свойства по сравнению с традиционной технологией – пайкой.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

1. Установлено, что для изготовления биметаллических деталей методом коаксиальной лазерной наплавки наиболее целесообразно использование порошка сферической формы марки ПМС-М99,9:

-гранулометрический анализ порошков показал, что порошок осколочной формы марки ПМ-М имеет отклонения по размерам фракции, что не позволяет в достаточной мере фокусировать поток и затрудняет транспортировку порошка;

- в процессе параметрического анализа единичных валиков и трехмерных объектов не удалось разработать режим наплавки порошка ПМ-М для получения качественного бездефектного наплавленного слоя.

2. Получена адекватная модель процесса коаксиальной лазерной наплавки единичных валиков, с помощью которой возможно определить значение микротвердости в любой точке факторного пространства.

3. Определены рациональные режимы лазерной наплавки одиночных валиков молибденового порошка ПМС-М99,9 на литую сталь 25Л: 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.

4. Разработаны рациональные режимы лазерной наплавки единичного и функционального объемного слоя молибденового порошка ПМС-М99,9 на литую углеродистую 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 1мм, $\Delta z \approx 0,25$ мм, позволившие получить функциональный защитный слой без дефектов.

5. Сравнительные исследования микроструктуры молибденовых слоев, полученных лазерной наплавкой и вакуумной пайкой показали, что лазерная наплавка обеспечит лучшие эксплуатационные свойства за счет отсутствия дополнительного легкоплавкого материала в соединении (меди).

6. Анализ твердости молибденовых слоев, полученных наплавкой порошка ПМС-М99,9 и молибденовой пластины после пайки, показал, что твердость молибденового слоя, полученного лазерной наплавкой выше в $\sim 2,4$ раза.

7. Определены характеристики износостойкости функциональных покрытий из молибдена, полученных лазерной наплавкой молибденового порошка ПМС-М99,9 и традиционной пайкой молибденовой пластины ВМ1 в условиях различных механизмов изнашивания, установлено, что наплавленные покрытия обладают лучшими характеристиками износостойкости, чем покрытия, полученные традиционной пайкой:

- в условиях фреттинга коэффициенты трения у обоих покрытий практически одинаковы и составляют $\sim 0,25$, а 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 ($\sim 0,47$ и $\sim 0,67$ соответственно), при этом объемный износ образцов с наплавленным молибденовым покрытием в 1,6 раза ниже в сравнении с покрытиями, изготовленными пайкой.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ 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.

Для подтверждения вышеописанных преимуществ коаксиальной лазерной наплавки молибдена на сталь перед пайкой 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 4.1, 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 4.1, в) и кратковременная работа в продуктах сгорания топлива при высоких температурах.

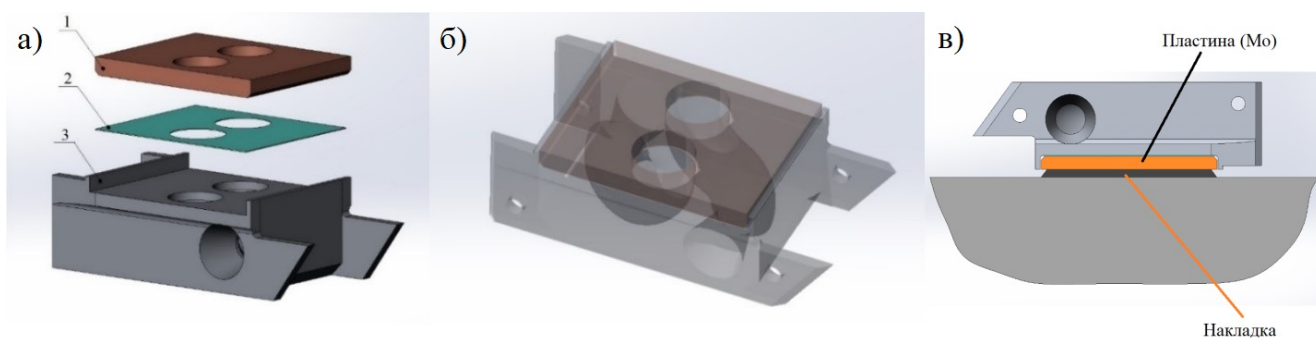


Рисунок 4.1 – Составные части детали «Корпус» (а), внешний и внутренний контур детали (б), рабочее положение детали (в)

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

4.1 Традиционная технология изготовления биметаллической детали «Корпус»

Тип производства изделий, в состав которых входит биметаллическая деталь «Корпус» – серийный, готовые изделия производят в определенном количестве с установленной периодичностью [96].

Принимая во внимание конструкцию детали, эксплуатационные требования и тип производства, изготовление детали «Корпус» по составным частям обусловлено технологичностью и снижением стоимости производства.

Таким образом, определены методы изготовления биметаллической детали «Корпус»: отливка (литой корпус) изготавливается из стали марки 25Л ГОСТ 977 методом литья по выплавляемым моделям (ЛВМ – традиционная технология изготовления точных отливок). К литому стальному корпусу припаивается молибденовая пластина с помощью вакуумной диффузионной пайки. Молибденовая пластина изготавливается из порошка марки ВМ1 методом спекания с последующей прокаткой. Молибденовая пластина припаивается с помощью медного припоя, в качестве припоя используется холоднокатаный сортамент в виде ленты марки М1 ГОСТ 1173. Пайка проходит в вакуумных электропечах в специальной оснастке.

Производственный цикл изготовления биметаллической детали «Корпус» по традиционной технологии включает в себя следующие этапы:

- изготовление литой заготовки из стали 25Л;
- механическая обработка заготовок (отливка, молибденовая пластина);
- диффузионная вакуумная пайка;
- окончательная механическая обработка согласно сборочному чертежу;

- проведение контрольных операций для подтверждения качества.

4.1.1 Изготовление литого стального корпуса

Технология изготовления отливок методом ЛВМ включает следующие основные операции:

- Изготовление моделей из воска и сборка формы;
- Нанесение керамического покрытия на восковую форму;
- Плавка и заливка металла в формы;
- Удаление керамического покрытия и литниково питающей системы, обрубка отливок;
- Термическая обработка литых заготовок;
- Пескоструйная и слесарная обработка;
- Контроль качества.

Восковые модели для литья ЛВМ как правило изготавливаются с помощью инжестирования воска в пресс-формы [97]. Отливка имеет сложную конфигурацию из-за внутренних каналов, которые необходимо выполнить литьем с высокой точностью и низкой шероховатостью. Для выполнения таких каналов в пресс-форму вставляют специальные карбамидные стержни, повторяющие геометрию каналов отливки.

Карбамидные стержни изготавливаются следующим образом: расплавленную смесь (карбамид – 97 %, борная кислота – 3 %) заливают в специальный стержневой ящик при 130 °С, после застывания смеси разбирают ящик и извлекают стержни. Стержни зачищают от заусенцев и переливов (при необходимости дефекты или неровности заделывают жидким составом с помощью шпателя).

При изготовлении восковых моделей, карбамидные стержни устанавливают в пресс-форму в специальные пазы. Далее расплавленный пастообразный восковый модельный состав (парафин – 50 %, стеарин – 50 %) запрессовывают в подготовленную и собранную пресс-форму при температуре от плюс 45 °С до

плюс 60 °С. Охлаждают, раскрывают пресс-форму и извлекают модель. Извлеченную модель со стержнями (рисунок 4.2, а) помещают в ванну с водой для растворения карбамидных стержней. Готовая к сборке восковая модель представлена на рисунок 4.2, б.

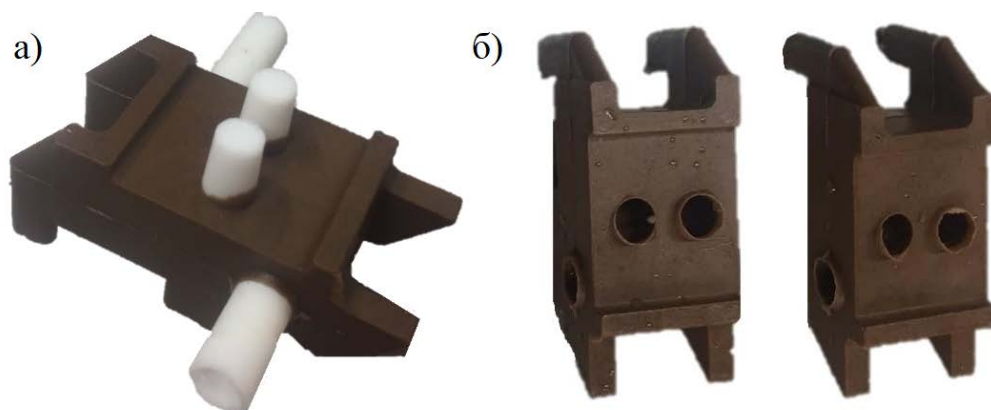


Рисунок 4.2 – Внешний вид: восковой модели с карбамидными стержнями (а), готовые к сборке восковые модели (б)

Сборку модельных блоков производят вручную, припаявая модели к заранее подготовленному стояку, согласно эталонному блоку. Место припаивания моделей выполняют две функции одновременно: держат модель на стояке и служат «питателями» (с помощью них в полости формы попадает жидкий металл). В местах припаивания необходимо выполнить галтели для предотвращения напряжений возникающих в керамической форме при заливке жидкого металла.

Далее на собранный модельный блок (рисунок 4.3, а) наносят специальную суспензию (на водной или спиртовой основе) методом окунания. Сырой модельный блок окунают в ванну с керамическим огнеупором (смесь кварцевого песка и маршалита). Сушка на воздухе в течении от 4 до 24 часов. Далее процесс повторяется до нанесения 8 слоев. Готовый модельный блок с нанесенным керамическим покрытием закладывают в печь (воронкой вниз) для вытопки воска. Воск стекает на поддон и используется снова. Таким образом в керамической форме образуются полости, которые в будущем будут залиты жидким металлом.

Керамические формы промывают теплой водой для удаления пыли и остатков восковой массы, затем формы консервируют (рисунок 4.3, б).

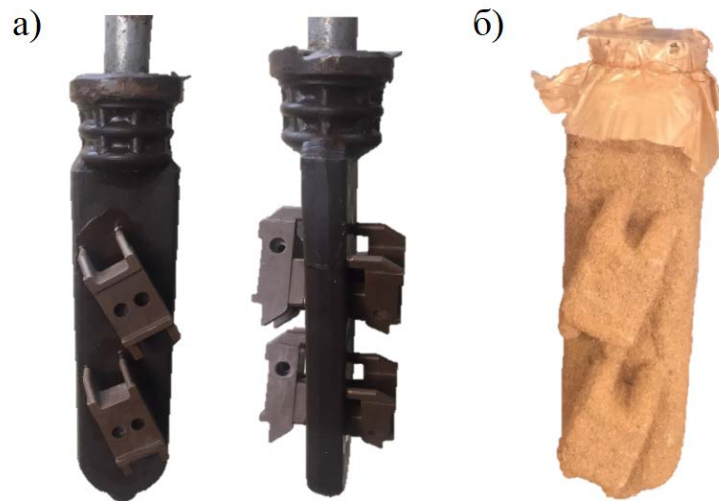


Рисунок 4.3 – Внешний вид: собранного модельного блока (а), готовой к заливке керамической формы (б)

Самая важная операция, определяющая качество отливок — это плавка и заливка металла в формы. Химический состав и механические свойства будущей отливки во многом зависят от качества приготовленного металла [98]. Сталь 25Л плавят в индукционных тигельных печах. В тигли печи загружают очищенные шихтовые материалы согласно расчету. Расчет производят с учетом угара химических элементов в процессе индукционной плавки [99].

Перед заливкой формы прокаливают в печах при температуре от плюс 800 °С до плюс 900 °С в течении 2 часов. Горячие формы подают на заливочный плац непосредственно перед выпуском металла. Температура заливки стали 25Л от плюс 1580 °С до плюс 1620 °С.

В процессе также заливают формы с образцами свидетелями для определения итогового химического состава и механических свойств. После того, как формы остывают их выбивают с помощью специальных барабанов. Отливки необходимо отрезать от стояков и полностью очистить от остатков керамики.

Термическую обработку отливок с образцами проводят в камерных электропечах сопротивления. Режим термической обработки назначается в

зависимости от требуемых механических свойств [100]. В данном случае режим термической обработки: нормализация при температуре от плюс 880 °С до плюс 900 °С, время выдержки 2 часа и отпуск при температуре от плюс 610 °С до плюс 630 °С, время выдержки 3 часа, охлаждение на воздухе. Готовая отливка (рисунок 4.4) подвергается контролю качества.



Рисунок 4.4 – Внешний вид литого корпуса из стали 25Л

Объем контроля качества корпусных отливок включает в себя:

- определение химического состава;
- определение механических свойств;
- поштучный визуальный контроль на отсутствие дефектов;
- проверка геометрических размеров согласно чертежу отливки;
- 100 % контроль на отсутствие внутренних литейных дефектов (пор, раковин, остатков керамики в каналах).

4.1.2 Механическая обработка составных частей детали «Корпус»

Процесс механической обработки включает следующие основные операции:

- Фрезерная обработка;
- Слесарная обработка;
- Контроль качества.

Механическая обработка составных частей детали «Корпус» (стальная отливка и молибденовая пластина) выполняется на фрезерных универсальных

станках типа 6P82 и 5-ти осевых обрабатывающих центрах с ЧПУ типа DMU 50. Механическую обработку допускается выполнять на любом типе оборудования обеспечивающие допуски, указанные в КД.

Стальную отливку предварительно обрабатывают на универсальных станках в необходимый габаритный размер (для фиксации в специальной оснастке) создавая при этом базу для обработки на станках с ЧПУ. Фрезеруют литниково-питающую систему и наплывы заподлицо с основной поверхностью. Устанавливают заготовку в тиски, нулевую точку определяют от литых поверхностей согласно карты эскизов. Фрезеруют верхний торец и боковые плоскости. Производят замеры и наносят фактическое значение на плоскость верхнего торца с помощью индикатора со специальной насадкой.

Фрезерную обработку на станках с ЧПУ проводят в несколько установов. Заготовку устанавливают в тиски, нулевую точку определяют от литейных размеров и фактических размеров, согласно эскизам. Фрезеруют плоскости и торцы, а также выполняют отверстия и обнижения. По торцам и отверстиям пластины оставляют припуск 0,5 мм для финишной механической обработки. Внешний вид обработанной отливки под пайку представлен на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Внешний вид обработанной отливки под пайку

После выполненной механической обработки производят контрольные операции: проверяют исполнительные размеры, указанные в КД, проводят внешний осмотр на отсутствие дефектов. Далее на подготовленный стальной корпус припаивают молибденовую пластину.

Паянный узел снова подвергается окончательной механической обработке для выравнивания зазоров и неровностей по торцам и отверстиям после пайки, выполняются классные размеры.

4.1.3 Диффузионная вакуумная пайка

Процесс диффузионной вакуумной пайки включает следующие основные операции:

- Подготовка материалов и заготовок к пайке;
- Сборка под пайку;
- Диффузионная вакуумная пайка;
- Контроль качества пайки.

Для получения прочного соединения необходимо, чтобы места пайки были очищены от окалины и окисной пленки, а также от загрязнений, полученных в процессе механической обработки (следы масла и грязи).

Очистка поверхности металлов под пайку может осуществляться несколькими способами: термическая, механическая, химическая. Перечисленные методы очистки поверхности имеют свои преимущества и недостатки, конкретные методы устанавливаются в зависимости от конфигурации деталей (места пайки), методов пайки и объемов производства.

Учитывая конструкцию детали «Корпус» и объемы производства, с целью гарантированной очистки деталей перед пайкой выбран способ подготовки, включающий в себя все три вышеупомянутых методов подготовки поверхности.

Для предотвращения появления окисных пленок применяли механический способ подготовки поверхности. При изготовлении деталей из отливок (сталь 25Л) после механической обработки, детали консервировали. Достоинства механической подготовки поверхности в создании определенной шероховатости поверхности, улучшающей капиллярное течение припоя [101]. Подготовка поверхности перед пайкой выполнялась в процессе механической обработки.

С целью гарантированной очистки деталей (отливки корпуса) от загрязнений перед пайкой проводили отжиг в среде вакуума при температуре 1050 °С в течении 30 мин – это термический способ очистки.

Медный припой из ленты М1 изготавливается непосредственно перед пайкой с помощью штампа по конфигурации места пайки.

Далее все составляющие детали (отливка, пластина, припой) обезжиривают ветошью, смоченной бензином – это химический способ очистки поверхности. Обработка поверхностей химическим путем может сопровождаться отрицательными явлениями, например, наводороживанием, поэтому рекомендации по составам и режимам обработки основываются на производственном опыте [102].

Сборка под пайку. Способ сборки узлов под пайку имеет большое значение т.к. обеспечивает качество паянного соединения. В данном случае используют многоместное приспособление из жаропрочной стали. Использование приспособлений позволяет повысить производительность труда, обеспечить заданную конфигурацию детали, локализовать нагрев в местах паянного соединения. Сборку производят по отверстиям в пластине и литом корпусе в следующем порядке: на литой корпус в специальные пазы кладут заранее подготовленный медный припой и накрывают молибденовой пластиной (рисунок 4.6). От смещения сборку фиксируют технологическими пробками, вставляя их в отверстия.

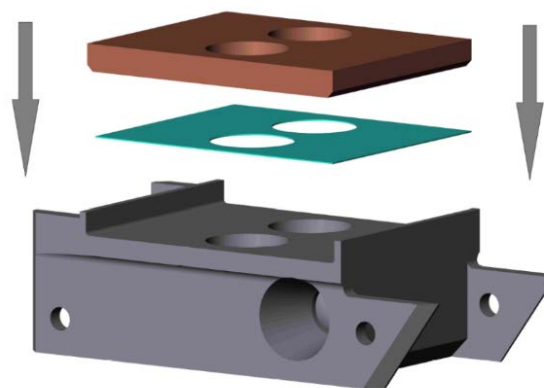


Рисунок 4.6 – Сборка узла под пайку

Пайку проводили в вакуумной электропечи СНВЭ, 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.

После выполнения пайки проводятся контрольные операции, подтверждающие качество выполненной работы. Объем контроля качества пайки включает в себя:

- визуальный контроль;
- металлографический контроль.

Визуальный контроль – это осмотр каждой детали на отсутствие видимых дефектов и отклонений в зоне паяного соединения (вытекание припоя, геометрические отклонения (поводки) материалов).

Для выполнения металлографического контроля визуально отбирают самый наихудший узел или любой (в случае получения идентичных деталей) от каждой садки. Паянную деталь разрезают в поперечном сечении, так чтобы в зону реза не попадали отверстия. Далее из отрезанного образца готовят шлиф по стандартной технологии, после чего проводят контроль на отсутствие трещин, пор и других дефектов, возникающих в процессе пайки в зоне паяного шва.

После проведения пайки, узел отправляется на окончательную механическую обработку для выравнивания зазоров и неровностей, образовавшихся после пайки по торцам и отверстиям пластины.

4.2 Разработка технологических рекомендаций при изготовлении биметаллической детали «Корпус» с применением коаксиальной лазерной наплавки

Комбинированная технология изготовления биметаллической детали «Корпус» заключается в сочетании традиционной технологии изготовления стального литого корпуса методом литья ЛВМ и коаксиальной лазерной наплавке молибденового порошка на стальной корпус, при этом формируется защитный функциональный слой молибдена на литом корпусе из стали 25Л.

Молибденовый порошок марки ПМС-М99,9 (производства ПМХ «ПОЛЕМА») поставляется в герметичной таре. Входному контролю подвергается каждая партия молибденового порошка. При входном контроле проводится проверка химического и гранулометрического состава порошка.

Химический состав определяют по стандартной методике. Химический состав молибденового порошка марки ПМС-М99,9 должен соответствовать таблице 2.7. Гранулометрический состав порошка марки ПМС-М99,9 должен соответствовать следующим требованиям: отклонения частиц порошка основной фракции от 40 до 100 мкм не более 10 %, сферичность не менее 70 %. Гранулометрический анализ осуществляется согласно вышеописанной методике. Результаты исследований заносят в протокол испытаний [103]. В случае получения неудовлетворительных результатов химического или гранулометрического анализов партию порошка бракуют.

Для коаксиальной лазерной наплавки молибденового порошка марки ПМС-М99,9 применяют оборудование для процесса прямого подвода энергии и материала в соответствии с классификацией ГОСТ Р 57588. Установки для наплавки должны обладать следующими характеристиками: точность позиционирования не более 0,05 мм/м, длина волны излучения 1,06 мкм, максимальная мощность излучения не менее 2000 Вт, фокусное расстояние объектива 200 мм.

Процесс лазерной наплавки защитного молибденового покрытия детали «Корпус» состоит из следующих операций:

1. В специальной оснастке зажимается предварительно обработанная стальная отливка. Оснастку устанавливают и фиксируют на столе. Для повышения производительности необходимо использовать многоместную оснастку, при этом проводится корректировка программы сканирования.

2. Производится сканирование и оцифровка установленных деталей для точного позиционирования при наплавке [104]. По специально написанной программе происходит наплавка (рисунок 4.7).

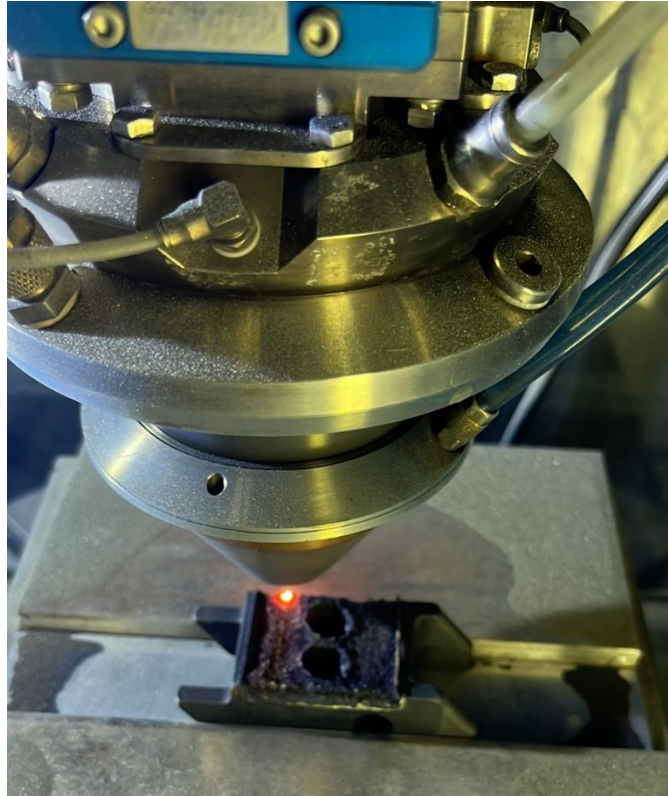


Рисунок 4.7 – Наплавка порошка ПМС-М99,9 на литой стальной корпус

3. Сначала наплавляется контур рабочей зоны детали при помощи одиночных валиков, затем наплавляется первый единичный слой, далее наплавляется контур и второй слой. И так, слой за слоем, до обеспечения требуемой толщины наплавленного слоя ≈ 5 мм.

В процессе наплавки изменяется параметр мощности лазерного излучения: первый слой $P=500$ Вт, второй слой $P=900$ Вт, для последующих $P=1000$ Вт. Остальные параметры в процессе наплавки не меняются: 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 1,0 мм, перемещение сопла по вертикальной оси $\Delta z = 0,25$ мм. Защитная атмосфера – аргон, диаметр пятна лазера 120 мкм. Расстояние от сопла до подложки (стального корпуса) 11 мм.

Для уменьшения анизотропии свойств, производится изменение направления наплавки на 90° от слоя к слою, тем самым реализуется стратегия сканирования (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Схема наплавки и стратегия сканирования

4. После наплавки детали подвергаются визуальному осмотру. Далее проводят механическую обработку с последующим контролем качества наплавки.

Шероховатость боковой поверхности наплавки должна соответствовать третьему классу шероховатости и иметь значение R_z от 80 до 40 мкм.

Качество наплавки молибденового слоя проверяют методом неразрушающего контроля [105]. Подтверждается отсутствие дефектов в виде: внутренних полостей, пор, несплавлений, включений, трещин. От партии отбирается одна деталь для микроструктурного анализа границы наплавки Мо-сталь, на предмет дефектов в виде трещин.

Принцип механической обработки детали «Корпус» изготовленной с применением лазерной наплавки аналогичен механической обработке при традиционной технологии. Изменению подлежит очередность выполняемых операций. Сначала создаются базы для фиксации в оснастке и подготовка зоны для наплавки. Затем окончательная механическая обработка после наплавки. На рисунке 4.9 представлена деталь «Корпус» на разных этапах производства. В процессе механической обработки параллельно выполняются контрольные операции: проверка качества наплавки и замеры геометрических размеров.



Рисунок 4.9 – Внешний вид литой заготовки (а), заготовки после наплавки (б), готовой детали (в)

По разработанным технологическим рекомендациям для изготовления биметаллических деталей «Корпус», включающих коаксиальную лазерную наплавку металлического порошка молибдена на литую углеродистую сталь, изготовлены детали, которые прошли успешную апробацию на машиностроительном предприятии по результатам которой получен акт внедрения (приложение А).

На способ изготовления биметаллической детали «Корпус» с применением коаксиальной лазерной наплавки молибденового порошка марки ПМС-М99,9 на литую сталь 25Л оформлена заявка на изобретение №204109695 от 10.04.2024 (приложение Б).

4.3 Сравнительный анализ изготовления биметаллической детали «Корпус» по традиционной и предложенной технологиям

4.3.1 Моделирование максимальных уровней нагрева конструкции детали «Корпус» для прогнозирования работоспособности деталей, изготовленных по традиционной и разработанной технологиям

С целью оценки максимальных уровней нагрева элементов конструкции детали «Корпус» в процессе эксплуатации был произведен расчет изменения температурного поля элементов конструкции детали от времени протекания продуктов сгорания в канале. Деталь «Корпус» – устройство, через каналы

которого протекают горячие газы. Деталь состоит из стального литого корпуса (сталь 25Л), пластины из молибденового сплава ВМ1, которые соединяются между собой вакуумной пайкой с помощью медного припоя М1 (рисунок 4.10).

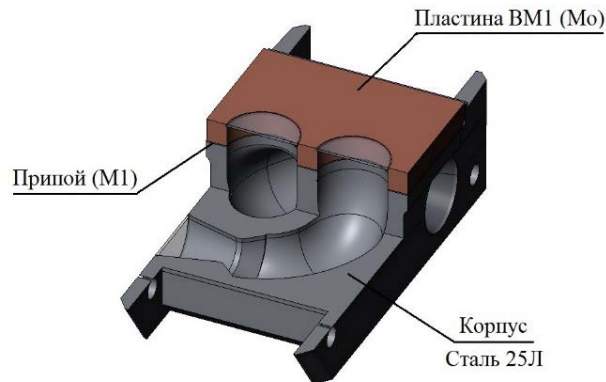


Рисунок 4.10 – Конструкция детали «Корпус» в разрезе

Расчётная оценка температурного режима нагрева элементов конструкции детали «Корпус» при протекании в каналах продуктов сгорания топлива может быть проведена путем решения сопряженной задачи газодинамики, теплообмена и нестационарной теплопроводности для сложной конструкции «Корпуса», выполненной из материалов с различными теплофизическими свойствами, в трехмерной постановке. Процессы тепло- и массообмена с точки зрения механики сплошных сред могут быть описаны системой нелинейных дифференциальных уравнений Навье-Стокса в частных производных. Общего аналитического решения системы этих уравнений пока не получено. При этом численные методы решения уравнений Навье Стокса, такие как метод конечных разностей, метод конечных объемов или метод конечных элементов, развиты довольно хорошо.

Для решения поставленной задачи, принимая во внимания сложность геометрической формы конструкции детали «Корпус» и постоянного изменения граничных условий теплообмена по длине газового тракта, в трехмерной постановке наиболее подходящим будет являться численный метод конечных элементов.

В соответствии с вышеизложенным расчет выполнялся в программном комплексе Solidworks Flow Simulation, представляющий собой вычислительный

инструмент для моделирования потоковых процессов в текучей среде (CFD-анализ) и теплообмена численным методом конечных элементов (FVM), что обеспечивает высокую степень достоверности получаемых результатов.

Методика моделирования в программном комплексе Solidworks Flow Simulation описана в Приложении В.

Математическая модель в программном комплексе Solidworks Flow Simulation основана на решении связанной задачи теплопроводности и вычислительной гидродинамики. Движение потока газа моделируется посредством решения уравнения Навье Стокса, что является интерпретацией законов сохранения массы, импульса и энергии для потока жидкости (газа). Состояние жидкости (газа) определяется эмпирическими зависимостями её плотности, вязкости, теплоёмкости и теплопроводности от температуры. Моделирование распределения температур с учетом постоянно изменяющихся граничных условий проходит на отдельном участке (сетке).

Построение сетки происходило в автоматическом режиме модуля «Глобальная сетка» Flow Simulation, при котором генерация сетки определяется числом ячеек базовой сетки, настройками дробления (наименьший размер ячеек, которые могут получиться в результате дробления) и процедурой разрешения узких каналов модели. Результаты генерации сетки представлены на рисунке 4.11 и таблице 4.1.

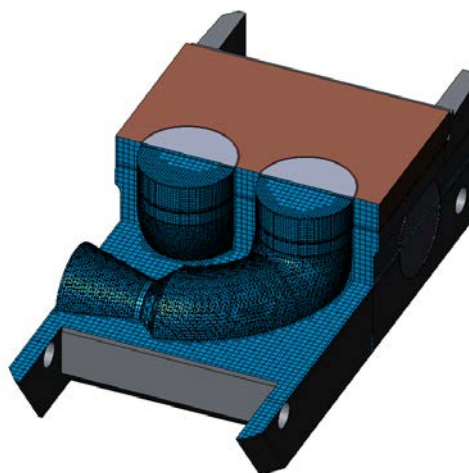


Рисунок 4.11 – Результаты построения расчетной сетки

Таблица 4.1 – Количество ячеек в расчетной сетке

Ячейки в текучей среде	125849
Ячейки в твердом теле	188184
Ячейки на границе раздела твердого тела с текучей средой (иррегулярные ячейки)	54492
Общее количество ячеек	314033

Время работы детали «Корпус» изготовленной по традиционной технологии с помощью пайки ограничено температурой плавления медного припоя 1083 °С (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Температура плавления материалов [106, 107]

Технология нанесения Мо	Температура плавления материалов, °С		
	Молибденовый слой	Медный припой (М1)	Отливка (Сталь 25Л)
Вакуумная пайка ВМ1	2622	1083	1490
Лазерная наплавка ПМС-М99,9	2622	-	

Горячие газы протекают через один из каналов детали «Корпус» в течение заданного времени. Движение горячих газов в канале обеспечивается посредством заданной постоянной разности давления на входе и выходе канала (вынужденная конвекция). Другой канал заполнен воздухом, движение внутри которого обуславливается условиями естественной конвекцией. Внешнее обтекание детали «Корпус» отсутствует (внутренняя задача). На протяжении всего времени протекания горячих газов через канал детали «Корпус», термодинамические параметры газов на входе в канал не изменяются.

Теплообмен с внешней средой отсутствует и можно считать все внешние поверхности детали «Корпус» теплоизолированными (адиабатная стенка), то есть через них не происходит оттока тепла. Характер теплообмена поверхностей канала детали «Корпус» с протекающими газами – конвективный, лучистый теплообмен не учитывался. Химические процессы фазовых переходов в твердых телах в расчете не учитывались.

Исходные данные по геометрии детали «Корпус» определены по 3D-модели. Теплофизические свойства материалов конструкции и параметры горячих газов представлены в таблице 4.3 и 4.4. Параметры воздуха принимались согласно встроенной в пакет Flow Simulation инженерной базы данных.

Таблица 4.3 – Теплофизические характеристики материалов [108, 109]

Материал	Сталь 25Л	BM1	M1
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	65	134	393
Теплоемкость C_p , Дж/(кг·К)	483	264	398
Плотность ρ , кг/м ³	7830	10200	8960

Таблица 4.4 – Параметры горячих газов

Температура горячих газов, К	1700
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,1262
Теплоемкость горячих газов, Дж/(кг·К)	1340
Динамическая вязкость, Па·с	$53 \cdot 10^{-6}$
Давление, Па	14964948

Рабочая область включает в себя две подобласти течения в каналах детали «Корпус» с соответствующими граничными условиями (рисунок 4.12).

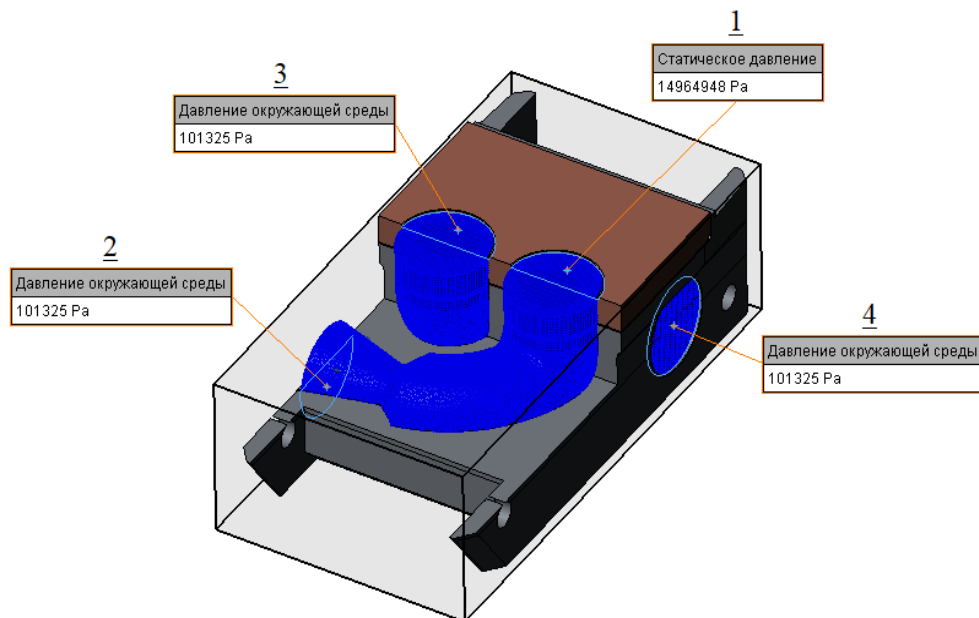


Рисунок 4.12 – Расчетные области и граничные условия течения в конструкции детали «Корпус»

Термодинамические параметры горячих газов на входе в канал (граничное условие 1): $T_{гг} = 1700 \text{ К}$ ($\sim 1427 \text{ }^\circ\text{С}$), $P_{гг} = 14964948 \text{ Па}$ ($\sim 148 \text{ атм}$).

Термодинамические параметры горячих газов на выходе из канала (граничное условие 2): $T_{гг}$ – по расчёту, $P_{гг} = 101300 \text{ Па}$ (1 атм).

Термодинамические параметры воздуха на входе и выходе из канала (граничные условия 3, 4): $T_{в} = 333 \text{ К}$ ($\sim 60 \text{ }^\circ\text{С}$), $P_{в} = 101300 \text{ Па}$ (1 атм).

Начальная температура материалов конструкции детали «Корпус»: $T_0(x,y,z) = 333 \text{ К}$ ($\sim 60 \text{ }^\circ\text{С}$).

На рисунке 4.13 показано температурное поле детали «Корпус» в начальный момент времени работы ($\tau = 0 \text{ с}$), температура составляет $T = 333 \text{ К}$ ($\sim 60 \text{ }^\circ\text{С}$).

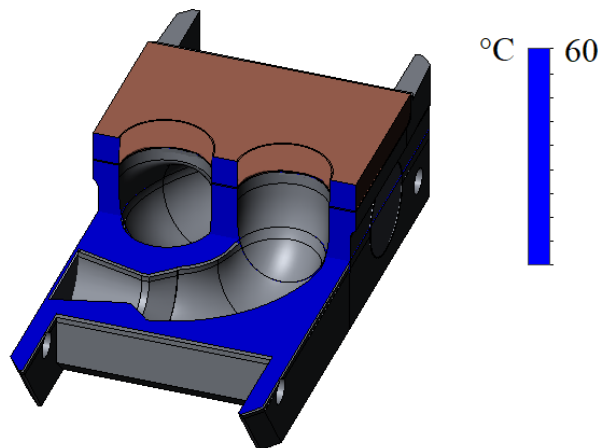


Рисунок 4.13 – Температурное поле конструкции детали «Корпус» в начальный момент времени $\tau = 0 \text{ с}$

На рисунке 4.14 показано температурное поле детали «Корпус» и протекающих газов по одному каналу в момент времени $\tau = 2 \text{ с}$. На рисунке 4.15 показано температурное поле детали «Корпус» при рабочем режиме через 2 с.

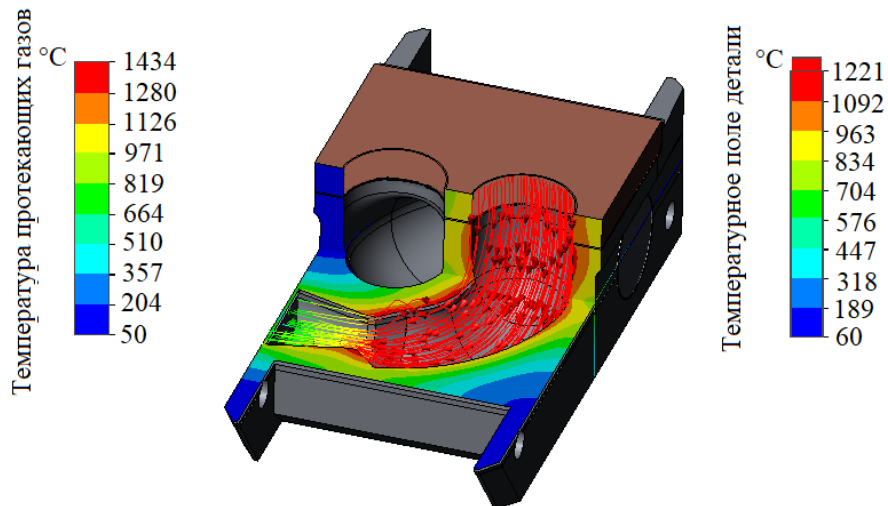


Рисунок 4.14 – Температурное поле конструкции детали «Корпус» и протекающих газов в одном канале в момент времени $\tau = 2$ с

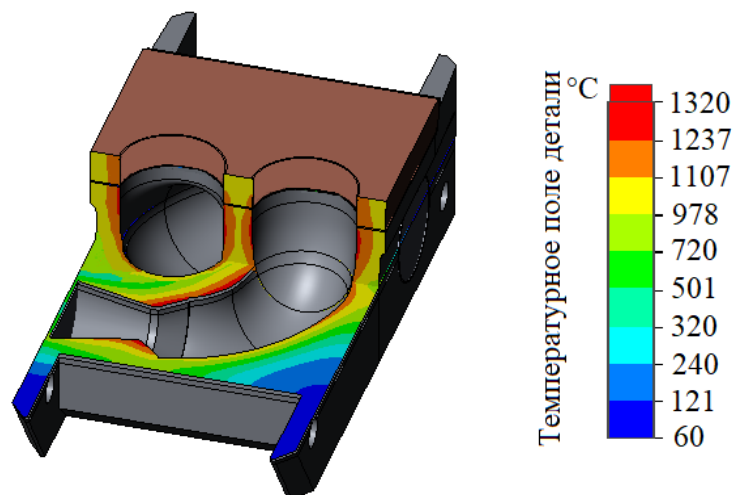


Рисунок 4.15 – Температурное поле конструкции детали «Корпус» при эксплуатационном режиме через 2 с

По результатам моделирования построен график изменения максимальной температуры элементов детали «Корпус» в зависимости от времени работы (рисунок 4.16).

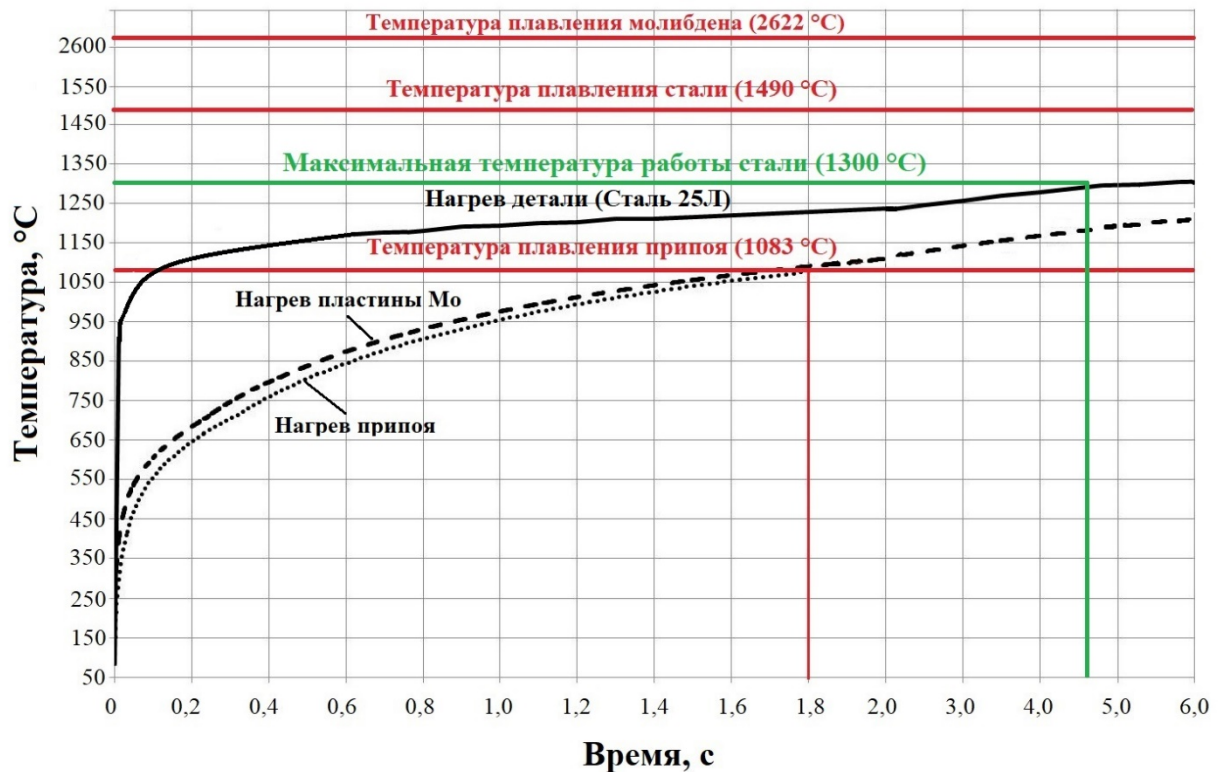


Рисунок 4.16 – График изменения температуры нагрева элементов детали «Корпус» в зависимости от времени работы

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 °C). Деталь «Корпус» теряет свою работоспособность, т.к. расплавленный припой перестает выполнять свою функцию. При лазерной наплавке работоспособность детали можно увеличить до температуры 1300 °C (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.

Проведенные стендовые испытания деталей, изготовленных по разработанной и традиционной технологиям, подтвердили адекватность математического моделирования.

4.3.2 Сравнительный анализ трудоемкости изготовления биметаллической детали «Корпус» по традиционной и предложенной технологиям

Производственный цикл изготовления биметаллической детали «Корпус» по традиционной технологии с применением вакуумной диффузионной пайки имеет больше технологических операций по сравнению с предложенной технологией включающую коаксиальную лазерную наплавку (рисунок 4.17).

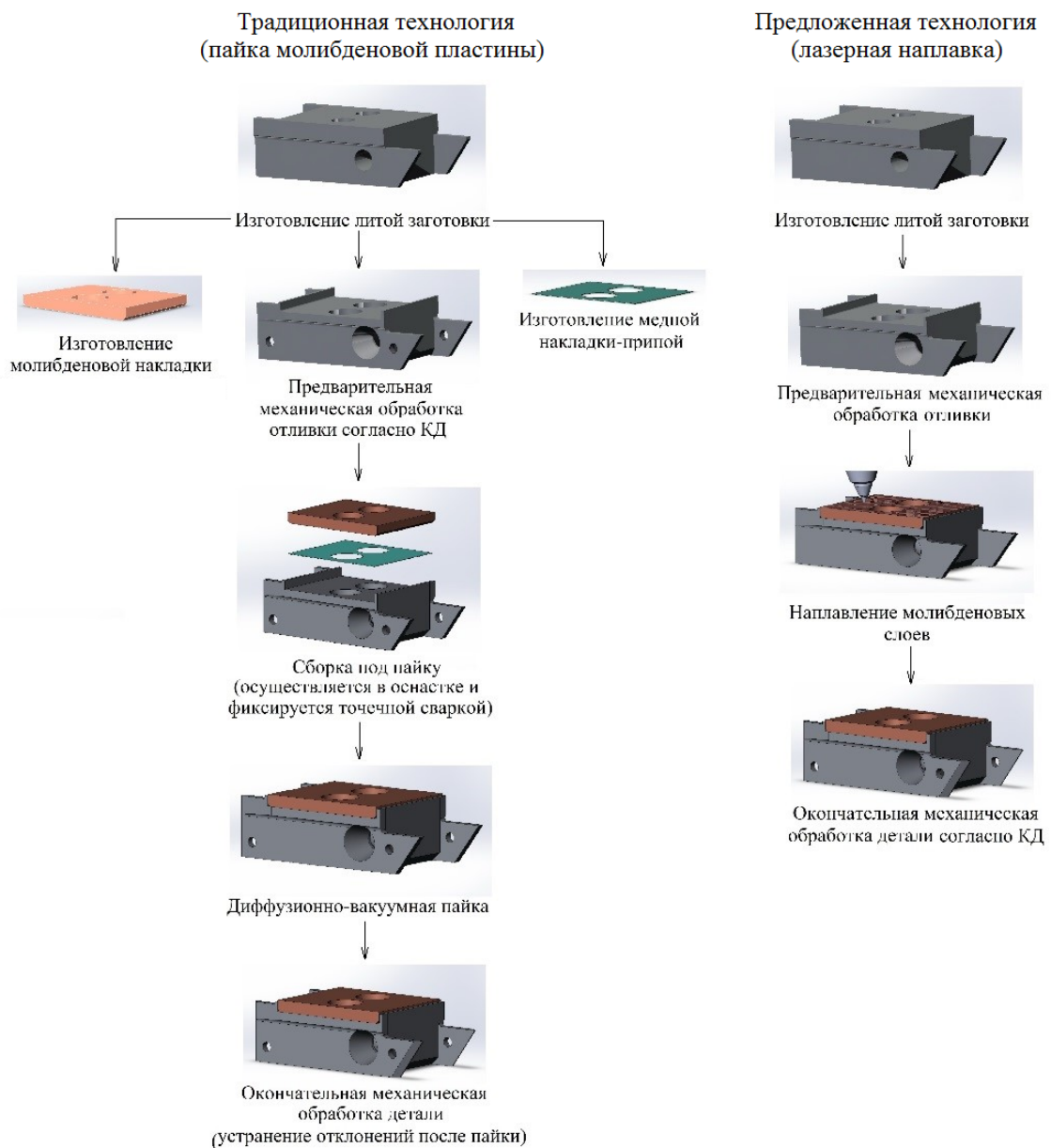


Рисунок 4.17 – Основные этапы производственного цикла изготовления биметаллической детали «Корпус» по традиционной технологии пайки (слева) и разработанной комбинированной технологии (справа)

Предложенная технология изготовления детали «Корпус» исключает следующие технологические операции:

1. Изготовление и механическая обработка молибденовой пластины;
2. Изготовление медного припоя;
3. Подготовка и сборка узла под пайку;
4. Вакуумная диффузионная пайка.

При расчете трудоемкости учитывались производительность оборудования и проводимые подготовительные операции. Трудоемкость изготовления детали «Корпус» вычисляли по формуле:

$$T = \sum(t_n + t_p)/N \quad (4.1)$$

где t_n – время, затраченное на изготовление максимального количества деталей за одну операцию, норм. ч;

t_p – время подготовительных операций, норм. ч;

N – количество изготовленных деталей за одну операцию, шт.

Результаты расчета трудоемкости изготовления детали «Корпус» по традиционной и предложенной технологии представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Трудоемкость изготовления детали «Корпус» по традиционной и предложенной технологии

Трудоемкость технологических операций, норм. ч	Традиционная технология (пайка)	Предложенная технология (наплавка)
Изготовление молибденовой пластины и медного припоя	6,08	-
Подготовка и сборка узла под пайку	0,42	-
Нанесение молибденового слоя	0,29	2,4
Механическая обработка	5,6	4,9
Итого	12,39	7,3

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

4.3.3 Сравнительный анализ себестоимости изготовления биметаллической детали «Корпус» по традиционной и предложенной технологиям

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 [110].

Стоимость материалов и оборудования для вакуумной пайки сопоставима со стоимостью материалов и оборудования для наплавки при изготовлении биметаллической детали «Корпус». В таблице 4.6 представлены результаты расчета стоимости изготовления детали «Корпус» по традиционной и предложенной технологиям.

В Приложении Г приведена методика и расчет стоимости изготовления биметаллической детали «Корпус» по традиционной и предложенной технологиям.

Таблица 4.6 – Результаты расчета стоимости изготовления детали «Корпус» по традиционной и предложенной технологиям

Этап	Вид затрат	Сумма, руб.	
		Традиционная технология (пайка)	Предложенная технология (лазерная наплавка)
Приобретение полуфабриката (отливки)	Покупка комплектующих (ПКИ)	1 650	1 650
Изготовление молибденовой накладки и медной накладки-припоя	Фонд оплаты труда, материалы и т.д.	19 100,65	-
Нанесение молибденового покрытия	Услуги, материалы	2 266	6 950
Механическая обработка	Фонд оплаты труда, материалы и т.д.	14 683,91	12 848,42
ИТОГО		37 700,56	21 448,42

На основе результатов расчета стоимости изготовления детали «Корпус» по двум технологиям в конкретных производственных условиях, установлено, что стоимость изготовления по предложенной технологии (с применением коаксиальной лазерной наплавки) снижается в 1,76 раза по сравнению с традиционной технологией (пайка).

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

1. Выбрана биметаллическая деталь «Корпус», изготовленная по традиционной технологии для исследований возможности замены вакуумной диффузионной пайки защитного молибденового покрытия на коаксиальную лазерную наплавку молибденового порошка на литую сталь.

2. Разработаны рекомендации по изготовлению биметаллических деталей «Корпус», комбинированной технологией, включающей коаксиальную лазерную наплавку молибденового порошка ПМС-М99,9 на литую углеродистую сталь.

3. Установлено, что предложенная технология снижает трудоемкость и стоимость изготовления биметаллической детали «Корпус» по сравнению с традиционной технологией в 1,7 и 1,76 раза соответственно

4. Анализ математической модели, прогнозирующей изменения температурного поля нагрева элементов деталей «Корпус» с наплавленным и припаянным покрытиями от времени работы показал преимущество наплавленных покрытий, замена традиционного процесса пайки на лазерную наплавку позволит увеличить работоспособность детали в 2,5 раза без изменения конструкции детали:

- деталь «Корпус» с припаянной молибденовой пластиной теряет свою работоспособность через 1,8 секунды, так как происходит, нагрев выше температуры плавления припоя (1083 °С) и расплавленный припой перестает выполнять свою функцию;

- нанесение защитного покрытия с помощью лазерной наплавки позволит увеличить работоспособность детали до температуры 1300 °С и время работы до 4,6 секунд.

5. Детали, изготовленные по предложенной технологии, прошли успешную апробацию на машиностроительном предприятии по результатам которой получен акт внедрения.

6. Подана заявка на изобретение №204109695 от 10.04.2024 на способ изготовления биметаллической детали «Корпус» с применением коаксиальной

лазерной наплавки молибденового порошка марки ПМС-М99,9 на литую сталь 25Л.

7. Разработанные рекомендации по изготовлению биметаллической детали «Корпус» с помощью коаксиальной лазерной наплавки молибденового порошка на литую сталь могут быть рекомендованы для производства подобного типа биметаллических деталей.

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 $\sim 2,5$ 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 57558-2017 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2020. - 12 с.
2. ASTM F2792-12 Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies [электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.astm.org/standards/f2792> (дата обращения 17.06.2024).
3. Тарасова, Т.В. Аддитивное производство: учебное пособие / Т.В. Тарасова. - Москва: ИНФА-М, 2023. - 196 с.
4. Григорьев, С.Н., Тарасова, Т.В. Возможности технологии аддитивного производства для изготовления сложнопрофильных деталей и получения функциональных покрытий для производства порошков / С.Н. Григорьев, Т.В. Тарасова // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2015. N 10. - С. 5-11.
5. Перспективы развития аддитивных технологий: отчет / Москва: РТБ-Консалтинг, 2016. - 180 с.
6. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. - М.: НАМИ, 2015. - 220 с.
7. ГОСТ Р 57588-2021 Аддитивные технологии. Оборудование для аддитивных технологических процессов. Общие требования. - Москва: Российский институт стандартизации, 2021. - 8 с.
8. Gibson, I., Rosen, D., W. Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies: monograph / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker W. - New York: Springer. - 2010. - 462 p.
9. Тарасова Т.В., Гусаров А.В., Протасов К.Э., Хмыров Р.С., Подрабинник П.А., Григорьев С.Н. Исследование структуры и свойств тонких элементов металлических решетчатых конструкций, изготовленных методом селективного лазерного плавления / Т.В. Тарасова, А.В. Гусаров, К.Э. Протасов, Р.С. Хмыров, П.А. Подрабинник, С.Н. Григорьев // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2024. - N 02. - С. 10.

10. Tarasova T. V., Podrabinnik P. A., Babushkin N. N., Khmyrov R. S., Grigoriev S. N. The quality of thin-walled structures of AlSi10Mg produced by selective laser melting / T. V. Tarasova, P. A. Podrabinnik, N. N. Babushkin, R. S. Khmyrov, S. N. Grigoriev. // High Temperature Material Processes. - 2024. - N 04. - P. 29-39.

11. Смуров, И.Ю., Тарасова, Т.В., Назаров, А. П., Котобан, Д.В. Оборудование и технология селективного лазерного плавления: монография / И.Ю. Смуров, Т.В. Тарасова, А.П. Назаров, Д.В. Котобан. - М.: ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", 2015. - 142 с.

12. Campanelli, S., Contuzzi, N., Angelastro, A., D. Ludovico, A. Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process / S. Campanelli, N. Contuzzi, A. Angelastro, A. D. Ludovico // New Trends in Technologies: Device, Computer, Communication and industrial Systems. - 2010. - P. 234–252.

13. 3D Printers, Software, Manufacturing & Digital Healthcare [электронный ресурс]. - Официальный сайт фирмы «3D Systems». - Режим доступа:

<https://www.3dsystems.com> (дата обращения 18.06.2024).

14. Additive Manufacturing solutions & industrial 3D printer by EOS [электронный ресурс]. - Официальный сайт фирмы «EOS». - Режим доступа:

<https://www.eos.info/en> (дата обращения 18.06.2024).

15. Your Partner in Selective Laser Melting SLM Solutions [электронный ресурс]. - Официальный сайт фирмы «SLM Solutions». - Режим доступа:

<https://www.slm-solutions.com> (дата обращения 18.06.2024).

16. Additive manufacturing products [электронный ресурс]. - Официальный сайт фирмы «Renishaw». - Режим доступа:

<https://www.renishaw.com/en> (дата обращения 18.06.2024).

17. Coaxial laser wire cladding head COAXwire Fraunhofer IWS [электронный ресурс]. - Официальный сайт фирмы «IWS Fraunhofer». - Режим доступа:

<https://www.iws.fraunhofer.de/en> (дата обращения 18.06.2024).

18. Григорьянц, А.Г., Мисюров, А.И., Шиганов, И.Н., Кротких, А.Д. Исследование технологических особенностей лазерной объемной наплавки / А.Г. Григорьянц, А.И. Мисюров, И.Н. Шиганов, А.Д. Кротких // Труды международной конференции «Лучевые технологии и применение лазеров». - 2015. - С. 137-142.

19. Patent Application Publication US2012/0193335 A1 United States. Method and device for manufacturing titanium objects. Inventor: Sigrid Guldborg. Appl. No: 13/390,203. Pub. Date: Aug. 2, 2012.

20. United States Patent US 8,598,523 B2 United States. Electron beam layer manufacturing using scanning electron monitored closed loop control. Inventor: Scott Stecker, Phillip E. Wollenhaupt. Appl. No: 12/902,520. Pub. Date: Dec. 3, 2013.

21. Pinkerton, A. J. Advances in the modeling of laser direct metal deposition / A. J. Pinkerton // LASER ADDITIVE MANUFACTURING. - 2015. - N S1. - P. 7.

22. Аддитивные технологии. Виды, особенности, характеристики аддитивных технологий [электронный ресурс]. – Современные технологии производства. - Режим доступа:

<https://extxe-com.turbopages.org/turbo/extxe.com/s/3834/sushhnost-i-osobennosti-additivnyh-tehnologii/> (дата обращения 19.05.2024).

23. Довбыш, В.М., Забеднов, П.В., Зленко, М.А. Аддитивные технологии и изделия из металла / В.М. Довбыш, П.В. Забеднов, М.А. Зленко // НАМИ. - 2015. - С. 57.

24. Himanshu Balhara, Bhaskar Botcha, Sarah Wolff, Satish Bukkapatnam Ripple formation and its effect on the multi-scale microstructure of Directed Energy Deposition (DED)-printed 316L components / Balhara Himanshu, Botcha Bhaskar, Wolff Sarah, Bukkapatnam Satish // Researchgate. - 2021. - P 27.

25. Tarasova, T. V., Gvozdeva, G.O., Stefen Nowotny, Ableyeva, R. R., Dolzhikova, E.Yu. Analysis of coaxial laser micro cladding processing conditions / T. V. Tarasova, G.O. Gvozdeva, Stefen Nowotny, R. R. Ableyeva, E.Yu. Dolzhikova // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. - 2018. - N 3 (4). - P. 1438-1442.

26. Pinkerton A.J., Lin Li. A verified model of the behaviour of the axial powder stream concentration from a coaxial laser cladding nozzle / A.J. Pinkerton, Lin Li // Proceedings of International Congress "ICALEO'2002". - 2002. - P. 10.

27. Лазерные технологии в машиностроении: Юбилейный сборник статей (1981-2021гг.) / под общ. ред. А.Г. Григорьянц. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. - 153 с.

28. Yao J., Kovalenko V.S., Zhang Q., Anyakin M., Hu X., Wang W. Modeling of laser cladding with diode laser robotized system / J. Yao, V.S. Kovalenko, Q. Zhang, M. Anyakin, X. Hu, W. Wang // Surface engineering and applied electrochemistry. - 2010. - N 46(3). - P. 82-86.

29. Занг, К., Яо, Д., Коваленко, В.С., Ху, Х., Анякин, Н.И., Кондрашев, П.В., Жук, Р.О., Степура, А.Н. Производительность и качество наплавки при коаксиальной подаче лазерного излучения и газопорошковой смеси (струи) / К. Занг, Д. Яо, В.С. Коваленко, Х. Ху, Н.И. Анякин, П.В. Кондрашев, Р.О. Жук, А.Н. Степура // Электронная обработка материалов. - 2015. - N 51(4). - С. 34-41.

30. Mazzarisi M., Errico1 V., Angelastro1 A., Campanelli1 S.L. Influence of standoff distance and laser defocusing distance on direct laser metal deposition of a nickel-based super alloy / M. Mazzarisi, V. Errico1, A. Angelastro1, S.L. Campanelli1 // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2022. - N 120. - P. 2407-2428.

31. Kovalenko V., Yao J., Zhang Q., Kondrashev P., Anyakin M., Zhuk R., Stepura O. Influence of the Interaction of Focused Laser Beam and Gas-Powder Stream on the Quality of Laser Processing / V. Kovalenko, J. Yao, Q. Zhang, P. Kondrashev, M. Anyakin, R. Zhuk, O. Stepura // Procedia CIRP. - 2013. - N. 6. - P. 498-503.

32. Григорьев С.Н., Тарасова Т.В., Гвоздева Г.О. Оптимизация параметров лазерной наплавки сплавов системы Al-Si / С.Н. Григорьев, Т.В. Тарасова, Г.О. Гвоздева // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2015. - N 10. - С. 15-21.

33. Klocke F., Wagner C., Ader. C. Development of an integrated model for selective laser sintering / F. Klocke, C. Wagner, C. Ader // Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. - 2007. - P. 387-392.

34. Васильцов, В.В., Галушкин, М.Г., Ильичев, И.Н., Мисюров, А.И., Панченко, В.Я. Послойная лазерная наплавка металлических порошков: аналитическая теория и эксперимент / В.В. Васильцов, М.Г. Галушкин, И.Н. Ильичев, А.И. Мисюров, В.Я. Панченко // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». - 2012. - С. 69-77.

35. Johnson L. John, Palmer Todd. Directed energy deposition of molybdenum / John L. Johnson, Todd Palmer // International journal of refractory metals and hard materials. - 2019. - N. 84. P. 11.

36. Roh Goo-Won, Park Eun-Soo, Moon Jaeyun, Lee Hojun, Byun Jongmin. Direct Energy Deposition of Mo Powder Prepared by Electrode Induction Melting Gas Atomization / Goo-Won Roh, Eun-Soo Park, Jaeyun Moon, Hojun Lee, Jongmin Byun // Arch. Metall. Mater. - 2021. - N. 66 (3). - P. 795-798.

37. Weng, F., Chen, C., Yu, H. Research status of laser cladding on titanium and its alloys / F. Weng, C. Chen, H. Yu // A review. Mater. Des. - 2014. - N. 58. - P. 412.

38. Riquelme, A., Rodrigo, P., Escalera-Rodríguez, M.D., Rams, J. Analysis and optimization of process parameters in Al–SiCp laser cladding / A. Riquelme, P. Rodrigo, M.D. Escalera-Rodríguez, J. Rams // Optics and Lasers in Engineering. - 2016. - N. 78. - P. 165.

39. Yang, J., Liu, F., Miao, X., Yang, F. Influence of laser cladding process on the magnetic properties of WC–FeNiCr metal–matrix composite coatings. / J. Yang, F. Liu, X. Miao, F. Yang // Mater. Process. Technol. - 2012. - N. 212. - P. 1862.

40. Jiao, X., Wang, J., Wang, C., Gong, Z., Pang, X., Xiong, S.M. Effect of laser scanning speed on microstructure and wear properties of T15M cladding coating fabricated by laser cladding technology / X. Jiao, J. Wang, C. Wang, Z. Gong, X. Pang, S.M. Xiong // Optics and Lasers in Engineering. - 2018. - N. 110. - P. 163.

41. Wang, W., Sun, Q., Wang, D., Hou, J., Qi, W., Li, D., Xie, L. Microstructure and Mechanical Properties of the ((CoCrFeNi)₉₅Nb₅)_{100-x}Mo_x High-Entropy Alloy Coating Fabricated under Different Laser Power / W. Wang, Q. Sun, D. Wang, J. Hou, W. Qi, D. Li, L. Xie // *Metals*. - 2021. - N. 11. - P. 1477.

42. Sun, M., Pang, M. Defect Formation Mechanism and Performance Study of Laser Cladding Ni/Mo Composite Coating / M. Sun, M. Pang // *Coatings*. - 2021. - N. 11. - P. 1460.

43. Oppong Boakye, G., Geambazu, L.E., Ormsdottir, A.M., Gunnarsson, B.G., Csaki, I., Fanicchia, F., Kovalov, D., Karlsdottir, S.N. Microstructural Properties and Wear Resistance of Fe-Cr-Co-Ni-Mo-Based High Entropy Alloy Coatings Deposited with Different Coating Techniques / G. Oppong Boakye, L.E. Geambazu, A. M. Ormsdottir, B.G. Gunnarsson, I. Csaki, F. Fanicchia, D. Kovalov, S.N. Karlsdottir // *Applied Sciences*. - 2022. - N. 12. - P. 3156.

44. Zheng, C., Liu, Z., Liu, Q., Kong, Y., Liu, C. Effect of Cr on Corrosion Behavior of Laser Cladding Ni-Cr-Mo Alloy Coatings in Sulfuric Acid Dew Point Corrosion Environment / C. Zheng, Z. Liu, Q. Liu, Y. Kong, C. Liu // *Coatings*. - 2022. - N. 12. - P. 421.

45. Li, W., Guo, W., Zhang, H., Xu, H., Chen, L., Zeng, J., Liu, B., Ding, Z. Influence of Mo on the Microstructure and Corrosion Behavior of Laser Cladding FeCoCrNi High-Entropy Alloy Coatings / W. Li, W. Guo, H. Zhang, H. Xu, L. Chen, J. Zeng, B. Liu, Z. Ding // *Entropy*. - 2022. - N. 24. - P. 539.

46. Lu, X.D., Wang H.M. High-temperature sliding wear behaviors of laser clad Mo₂Ni₃Si/NiSi metal silicide composite coatings / X.D. Lu, H.M. Wang // *Applied Surface Science*. - 2003. - N. 214. - P. 190-195.

47. Lemberg, J.A., Ritchie, R.O. Mo-Si-B Alloys for Ultrahigh-Temperature Structural Applications / J.A. Lemberg, R.O. Ritchie // *Advanced Materials*. - 2012. - N. 24. - P. 3445-3480.

48. Bewlay, B.P., Jackson, M.R., Subramanian, P., Zhao, J.C. A review of very-high-temperature Nb-silicide-based composites / B.P. Bewlay, M.R. Jackson, P. Subramanian, J.C. Zhao // *Metallurgical and Materials Transactions A*. - 2003. - N. 34. - P. 2043-2052.
49. Perepezko, J.H. The Hotter the Engine, the Better / J.H. Perepezko // *Science*. - 2009. - N. 326. - P. 1068-1069.
50. Wang, F., Shan, A., Dong, X., Wu, J. Microstructure and oxidation resistance of laser-remelted Mo–Si–B alloy / F. Wang, A. Shan, X. Dong, J. Wu // *Scripta Materialia*. - 2007. - N. 56. - P. 737-740.
51. Makineni, S., Kini, A., Jäggle, E., Springer, H., Raabe, D., Gault, B. Synthesis and stabilization of a new phase regime in a Mo-Si-B based alloy by laser-based additive manufacturing / S. Makineni, A. Kini, E. Jäggle, H. Springer, D. Raabe, B. Gault // *Acta Materialia*. - 2018. - N. 151. - P. 31-40.
52. Schmelzer, J., Rittinghaus, S.-K., Weisheit, A., Stobik, M., Paulus, J., Gruber, K., Wessel, E., Heinze, C., Krüger, M. Printability of gas atomized Mo-Si-B powders by laser metal deposition / J. Schmelzer, S.-K. Rittinghaus, A. Weisheit, M. Stobik, J. Paulus, K. Gruber, E. Wessel, C. Heinze, M. Krüger // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. - 2018. - N. 78. - P. 123-126.
53. Zhou, W., Sun, X., Tsunoda, K., Kikuchi, K., Nomura, N., Yoshimi, K., Kawasaki, A. Powder fabrication and laser additive manufacturing of MoSiBTiC alloy / W. Zhou, X. Sun, K. Tsunoda, K. Kikuchi, N. Nomura, K. Yoshimi, A. Kawasaki // *Intermetallics*. - 2019. - N. 104. - P. 33-42.
54. Zhou, W., Tsunoda, K., Nomura, N., Yoshimi, K. Effect of hot isostatic pressing on the microstructure and fracture toughness of laser additive-manufactured MoSiBTiC multiphase alloy / W. Zhou, K. Tsunoda, N. Nomura, K. Yoshimi // *Materials and Design*. - 2020. - N. 196. - P. 14.
55. Fichtner, D., Schmelzer, J., Yang, W., Heinze, C., Krüger, M. Additive manufacturing of a near-eutectic Mo–Si–B alloy: Processing and resulting properties / D. Fichtner, J. Schmelzer, W. Yang, C. Heinze, M. Krüger // *Intermetallics*. - 2020. - N. 128. - P. 17.

56. Guo, Z., Han, R., Li, Y., Zhu, Y., Zhang, B., Zhang, H. Mo-Si-B Alloy Formed by Optional Laser Melting Process / Z. Guo, R. Han, Y. Li, Y. Zhu, B. Zhang, H. Zhang // International Journal of Analytical Chemistry. - 2022. - N. 9. - P. 8.

57. Yan, A., Atif, A.M., Wang, X., Lan, T., Wang, Z. The Microstructure and Cracking Behaviors of Pure Molybdenum Fabricated by Selective Laser Melting / A. Yan, A.M. Atif, X. Wang, T. Lan, Z. Wang // Materials. - 2022. - N. 15. - P. 6230.

58. Faidel D., Jonas D., Natour G., Behr W. Investigation of the selective laser melting process with molybdenum powder / D. Faidel, D. Jonas, G. Natour, W. Behr // Additive Manufacturing. - 2015. - N. 8. - P. 88-94.

59. Wang, D., Yu, C., Ma, J., Liu, W., Shen, Z. Densification and crack suppression in selective laser melting of pure molybdenum / D. Wang, C. Yu, J. Ma, W. Liu, Z. Shen // Materials and Desing. - 2017. - N. 129. - P. 44-52.

60. Braun, J., Kaserer, L., Stajkovic, J., Leitz, K.-H., Tabernig, B., Singer, P., Leibenguth, P., Gspan, C., Kestler, H., Leichtfried, G. Molybdenum and tungsten manufactured by selective laser melting - Analysis of defect structure and solidification mechanisms / J. Braun, L. Kaserer, J. Stajkovic, K.-H. Leitz, B. Tabernig, P. Singer, P. Leibenguth, C. Gspan, H. Kestler, G. Leichtfried // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. - 2019. - N. 84. - P. 9.

61. Li, K., Wang, D., Xing, L., Wang, Y., Yu, C., Chen, J., Zhang, T., Ma, J., Liu, W., Shen, Z. Crack suppression in additively manufactured tungsten by introducing secondaryphase nanoparticles into the matrix / K. Li, D. Wang, L. Xing, Y. Wang, C. Yu, J. Chen, T. Zhang, J. Ma, W. Liu, Z. Shen // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. - 2019. - N. 79. - P. 158-163.

62. Wang, D., Wang, Z., Li, R., Ma, J., Liu, W., Shen, Z. Cracking in laser additively manufactured W: Initiation mechanism and a suppression approach by alloying / D. Wang, Z. Wang, K. Li, J. Ma, W. Liu, Z. Shen // Materials and Desing. - 2019. - N. 162. - P. 384-393.

63. Guo, K-K., Chen, J., Shang, S., Liu, C-S. Numerical simulation of atomization process of nickel-based alloy powders prepared by vacuum induction melting gas atomization / K-K. Guo, J. Chen, S. Shang, C-S. Liu // *Vibroengineering Procedia*. - 2020. - N. 32(3). - P. 185-189.

64. Алишин, М. И., Князев, А. Е. Производство металлопорошковых композиций высокой частоты титановых сплавов методом индукционной газовой атомизации для аддитивных технологий / М.И. Алишин, А.Е. Князев // *Труды ВИАМ*. - 2017. - N. 11. - С. 37-45.

65. Патент № 2553319 С1 Российская федерация, МПК С25С5/02 (2006-01-01). Способ получения порошка металла электролизом : № 2014108811/02 заявл. 06.03.2014 : опубл. 10.06.2015 / Матренин В.И., Паршакова Н.В., Стихин А.С., Тюрин А.С. ; заявитель ООО «Электрохимических Преобразователей».

66. Родионов, А.И., Ефимочкин, И.Ю., Буякина, А.А., Летников, М.Н. Сфероидизация металлических порошков / А.И. Родионов, И.Ю. Ефимочкин, А.А. Буякина, М.Н. Летников // *Авиационные материалы и технологии*. - 2016. - N. S1 (43). - С. 60-64.

67. Манцевич, Н.М. Исследовательская база получения металлических порошков для аддитивных технологий / Н.М. Манцевич // *Материалы АТОМЭКСПО*. - 2015.

68. Ферапонтова Н. ВНИИХТ: Россия ждет наши порошки / Н. Ферапонтова // *Редкие земли*. - 2017. - 3 апреля.

69. ВНИИНМ налаживает новое производство металлических порошков для 3Д-печати [электронный ресурс]. - Режим доступа:

<https://www.3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/vniinm-nalazivaet-novoe-proizvodstvo-metallicheskix-poroskov-dlya-3d-pecati?ysclid=lxsvhpfjc2753373544>

(дата обращения 24.06.2024).

70. Буякина, А. А., Летников, М. Н., Ефимочкин, И. Ю. Влияние параметров механического легирования на морфологию частиц металлокерамической порошковой композиции ВЖ175+TiCN / А.А. Буякина, М.Н. Летников, И.Ю. Ефимочкин // *Труды ВИАМ*. - 2017. - N. 9. - С. 27-34.

71. Бобровский, А. П., Ефимочкин, И. Ю., Большакова, А. Н., Худнев, А. А. Получение сферических гранул высокотемпературного металлического композиционного материала на основе молибдена / А.П. Бобровский, И.Ю. Ефимочкин, А.Н. Большакова, А.А. Худнев // Труды ВИАМ. - 2022. - N. 1. - С. 44-52.

72. ВИЛС материалы конференции «Прочность неоднородных структур ПРОСТ-2018». - 2018.

73. ГОСТ Р 57589-2017 Аддитивные технологические процессы базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования. - М.: Стандартинформ, 2019. - 12 с.

74. Тарасова, Т.В., Подрабинник, П.А., Филатова А.А. Гранулометрический анализ порошковых материалов для аддитивного производства: учебное пособие / Т.В. Тарасова, П.А. Подрабинник, А.А. Филатова. - М.: ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", 2017. - 44 с.

75. Сиротенко, Л.Д., Шлыков, Е.С., Абляз, Т.Р. Применение биметаллических материалов в машиностроении / Л.Д. Сиротенко, Е.С. Шлыков, Т.Р. Абляз // Современные проблемы науки и образования. - 2015. - N. 2-1. С. 12.

76. Бикулов, Р.А., Колесников М.С. Производство литых биметаллических штампов из дисперсионно-твердеющей стали и высокопрочного чугуна / Р.А. Бикулов, М.С. Колесников // Современные наукоемкие технологии. - 2008. - N. 4. - С. 68-69.

77. Технология получения биметаллов, полученных сваркой взрывом [электронный ресурс] // Вестник промышленности. - 2018. - Режим доступа: <https://tgdaily.ru/2018/01/27/tehnologiya-polucheniya-bimetallov-pol/> (дата обращения 24.06.2024).

78. Григоренко, Г.М., Пузрин, Л.Г., Полещук, М.А., Пузрин, А.Л. Биметаллические материалы и изделия, изготавливаемые способом высокотемпературной некапиллярной пайки / Г.М. Григоренко, Л.Г. Пузрин, М.А. Полещук, А.Л. Пузрин // Новые материалы. - 2011. - N. 3. - С. 51-57.

79. Порошки для аддитивного производства [электронный ресурс]. - Официальный сайт фирмы «Полема». - Режим доступа:

<http://www.polema.ru> (дата обращения 24.06.2024).

80. DMD-установка для наплавки МЛ7 [электронный ресурс]. - Официальный сайт фирмы ГК «Лазеры и аппаратура». - Режим доступа:

<http://www.laserapr.ru> (дата обращения 24.06.2024).

81. Григорьянц, А.Г., Ставертий, А.Я., Третьяков, Р.С. Пятикоординатный комплекс для выращивания деталей методом коаксиального лазерного плавления порошковых материалов / А.Г. Григорьянц, А.Я. Ставертий, Р.С. Третьяков // Технология машиностроения. - 2015. - N. 10. - С. 22-29.

82. Шишлов, А.Ю., Мельникова, М.А., Холопов, А.А., Мисюров, А.И., Пересторонин, А.В., Смирнов, А.Р. Особенности применения лазерного коаксиального плавления порошковых материалов для создания объектов из сплавов на основе меди / А.Ю. Шишлов, М.А. Мельникова, А.А. Холопов, А.И. Мисюров, А.В. Пересторонин, А.Р. Смирнов // Инженерный журнал: наука и инновации. - 2020. - N. 12. - С. 9.

83. ГОСТ 977-88 Отливки стальные. Общие технические условия. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. - 33 с.

84. Батиенков, Р.В., Большакова, А.Н., Ефимочкин И.Ю. Проблема низкотемпературной пластичности молибдена и сплавов на его основе (обзор) / Р.В. Батиенков, А.Н. Большакова, И.Ю. Ефимочкин // Труды ВИАМ. - 2018. - N. 3. - С. 12-17.

85. ГОСТ 1173-2006 Фольга, ленты, листы и плиты медные. Технические условия. - М.: Стандартинформ, 2008. - 22 с.

86. Камерные вакуумные печи сопротивления [электронный ресурс]. - Официальный сайт фирмы «ВНИИЭТО». - Режим доступа:

<http://www.istra-vniieto.ru> (дата обращения 16.04.2022).

87. Лопатин, В.Ю. Математическое планирование эксперимента / В.Ю. Лопатин. - М.: Московский государственный институт стали и сплавов, 1999. - 57 с.

88. Гайдарин, А.Н., Ефремова, С.А. Применение полного факторного эксперимента при проведении исследований: методические указания / А.Н. Гайдарин, С.А. Ефремова. - Волгоград.: ВолГТУ, 2008. - 16 с.

89. Тарасова, Т.В., Филатова, А.А. Методы исследования порошковых материалов, используемых для аддитивных технологий. Гранулометрический анализ: методические указания / Т.В. Тарасова. - М.: ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", 2017. - 12 с.

90. Назаров, А.П. Разработка технологического процесса изготовления сложнопрофильных деталей из жаропрочного кобальтового сплава методом селективного лазерного плавления: дис. канд. техн. наук: 05.02.07 / Назаров Алексей Петрович. - М., 2013. - 139 с.

91. Патент № 2013132862 А Российская федерация, МПК С23С4/10 В23К26/342. Порошковая композиционная смесь для лазерной наплавки на металлическую подложку : №2013132862/02 заявл. 16.07.2013 : опубл. 27.01.2015 / Григорьев С.Н., Тарасова Т.В., Попова Е.В., Смуров И.Ю. ; заявитель ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН".

92. Григорьянц, А.Г., Кошлаков, В.В., Ризаханов, Р.Н., Шиганов, И.Н., Мисюров, А.И., Фунтиков, В.А. Формирование биметаллических структур методом коаксиального лазерного плавления / А.Г. Григорьянц, В.В. Кошлаков, Р.Н. Ризаханов, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров, В.А. Фунтиков // Научные технологии в машиностроении. - 2019. - N. 3(93). - С. 32-38.

93. Kotoban, D., Aramov, A., Tarasova, T., Smurov, I. Possibility of multi-material laser cladding fabrication of nickel alloy and stainless steel / D. Kotoban, A. Aramov, T. Tarasova, I. Smurov // Physics Procedia. - 2016. - N. 83. - P. 634-646.

94. Гржимальский, Л.Л., Ильевский, И.И. Технология и оборудование пайки / Л.Л. Гржимальский, И.И. Ильевский. - М.: Машиностроение, 1980. - 240 с.

95. Лашко, С.В., Лашко, Н.Ф. Пайка металлов / С.В. Лашко, Н.Ф. Лашко. - М.: Машиностроение, 1988. - 376 с.

96. Кашицына, Т.Н. Производственный менеджмент: учебное пособие / Т.Н. Кашицына, Е.С. Ловкова. - Владимир: ВлГУ, 2020. - 200 с.

97. Ткаченко, С.С., Емельянов, В.О., Мартынов, К.В., Кузнецов, Р.В. О формировании контактной поверхности при литье по выплавляемым моделям / С.С. Ткаченко, В.О. Емельянов, К.В. Мартынов, Р.В. Кузнецов // Литейное производство. - 2018. - N 1. - С. 35-37.

98. Малинов, Л.С. Ресурсно- и энергосберегающие способы дифференцированной обработки сталей и чугунов / Л.С. Малинов // Metallurgy машиностроения. - 2018. - N 4. - С. 31-42.

99. Сидоров, В.В., Горюнов, А.В. Косенков, О.М. Основные положения металлургии литейных жаропрочных сплавов / В.В. Сидоров, А.В. Горюнов, О.М. Косенков // Литейное производство. - 2018. - N 6. - С. 6-12.

100. Козловский, А.Э. Термическая обработка углеродистых сталей: учебное пособие / А.Э. Козловский, М.Ю. Колобов. - Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т. - 2017. - 144 с.

101. Лукин, В.И., Рыльников, В.С., Старова, Л.Л., Иода, Е.Н., Ковальчук, В.Г. Голев, Е.В. Сварка и пайка в авиастроении / В.И. Лукин, В.С. Рыльников, Л.Л. Старова, Е.Н. Иода, В.Г. Ковальчук, Е.В. Голев // Авиационные материалы. - 2007. - С. 132-141.

102. Оспенникова, О.Г., Лукин, В.И., Афанасьев-Ходыкин, А.Н., Галушка, И.А. Технология высокотемпературной диффузионной пайки конструкции типа «БЛИСК» из разноименных сплавов / О.Г. Оспенникова, В.И. Лукин, А.Н. Афанасьев-Ходыкин, И.А. Галушка // Труды ВИАМ. - 2019. - N. 9. - С. 26-37.

103. ГОСТ Р 57556-2017 Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний. - М.: Стандартинформ, 2017. - 11 с.

104. Grigor'ev, S.N., Tarasova, T.V., Gvozdeva, G.O. Optimization of Parameters of Laser Surfacing of alloys of the Al-Si system / S.N. Grigor'ev, T. V. Tarasova, G.O. Gvozdeva // Metal Science and Heat Treatment. - 2016. - N. 57(9). - P. 589-595.

105. ГОСТ Р 58598-2019 Аддитивные технологии. Виды и методы неразрушающего контроля изделий. - М.: Стандартинформ, 2019. - 7 с.

106. Волков, А. И., Жарский, И. М. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. - М.: Советская школа, 2005. - 608 с.

107. Лякишев, Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник / Н.П. Лякишев. - М.: Машиностроение, 1996. - 992 с.

108. Справочник по авиационным материалам. Том 1. Конструкционные стали, чугуны и припои / ВИАМ - М.: Машиностроение, 1965. - 515 с.


109. Справочник по авиационным материалам. Том 3. Коррозионностойкие и жаропрочные стали и сплавы / ВИАМ - М.: Машиностроение, 1965. - 632 с.

110. Бердичевская, В.О. Учет затрат на производство и реализацию продукции и калькулирование себестоимости продукции / В.О. Бердичевская. - М.: Юрайт, 2024. - 146 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

«СОГЛАСОВАНО»

Заместитель генерального
директора – главный инженер

«12» 10 2023г.
 Костылев В.А.

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального
конструктора

«12» 10 2023г.
 Болев А.В.



АКТ

внедрения детали «Корпус», изготовленной комбинированным способом с помощью коаксиальной лазерной наплавки, в конструкцию изделий специального назначения

В связи с повышенной трудоёмкостью производства биметаллических деталей типа «Корпус» в сборочных единицах изделий специального назначения возникла необходимость в разработке альтернативной технологии получения биметаллических деталей данного типа с одновременным повышением их эксплуатационных характеристик – износостойкости.

Для выполнения данных требований был разработан комбинированный технологический процесс изготовления биметаллической детали «Корпус», заключающийся в нанесении на стальной литой корпус сложной формы защитного молибденового покрытия с помощью коаксиальной лазерной наплавки, с применением оборудования и металлопорошкового материала отечественного производства.

Биметаллическая деталь «Корпус» была изготовлена на АО «МКБ «Факел» по технологии, разработанной в рамках диссертационной работы Скоробогатова А.Е. под руководством доцента кафедры «ВТО» МГТУ «СТАНКИН» Тарасовой Т.В.

Сравнительные испытания износостойкости по различным методикам на образцах, вырезанных из деталей типа «Корпус», изготовленных в промышленных условиях по традиционной технологии (пайка) и комбинированной технологии (наплавка) показали превосходство защитного молибденового покрытия, полученного лазерной наплавкой в 1,6 – 2,0 раза. Наплавленное защитное молибденовое покрытие соответствует техническим требованиям, предъявляемым к данному типу деталей.

В результате сравнения трудоемкости производственного цикла и стоимости изготовления детали «Корпус» по традиционной технологии и с применением лазерной наплавки установлено, что трудоемкость предложенной технологии снижается в 1,7 раза, стоимость изготовления снижается ориентировочно в 1,76 раза относительно традиционной.

Учитывая результаты комплексного исследования и испытаний, биметаллические детали типа «Корпус», изготовленные по комбинированной технологии с помощью лазерной наплавки, могут быть применены в конструкции изделий специального назначения разработки АО «МКБ «Факел».

Главный металлург



С.А. Данилов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Заявка на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2024 109 695** (13) **A**

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ЗАЯВКА НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

Состояние делопроизводства: Экспертиза по существу (последнее изменение статуса: 09.05.2024)

(21)(22) Заявка: [2024109695](#), 10.04.2024

Делопроизводство

Исходящая корреспонденция	Входящая корреспонденция
Уведомление об удовлетворении ходатайства 08.05.2024	Ходатайство о проведении экспертизы заявки по существу 10.04.2024
Уведомление о положительном результате формальной экспертизы 06.05.2024	
Уведомление об удовлетворении ходатайства 06.05.2024	Ходатайство об освобождении от уплаты пошлин или уменьшении размера 10.04.2024
Уведомление о зачете пошлины 06.05.2024	Платежный документ 10.04.2024
Уведомление о поступлении документов заявки 10.04.2024	

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Методика моделирования максимальных уровней нагрева конструкции детали «Корпус» в программном комплексе Solidworks Flow Simulation

Моделирование максимальных уровней нагрева конструкции детали «Корпус» проводили в программном комплексе Solidworks Flow Simulation. Сначала необходимо в диалоговом окне «Общие настройки» выбрать тип задачи (рисунок В1). Выбрали тип задачи – внутренняя, необходимо определить распределение температур внутри детали. Внешние факторы не учитывались, т.к. не могут существенно повлиять на результат. В графе физические модели выбираем: теплопроводность в твердых телах и нестационарность т.к. условия нагрева детали «Корпус» изменяются с течением времени.

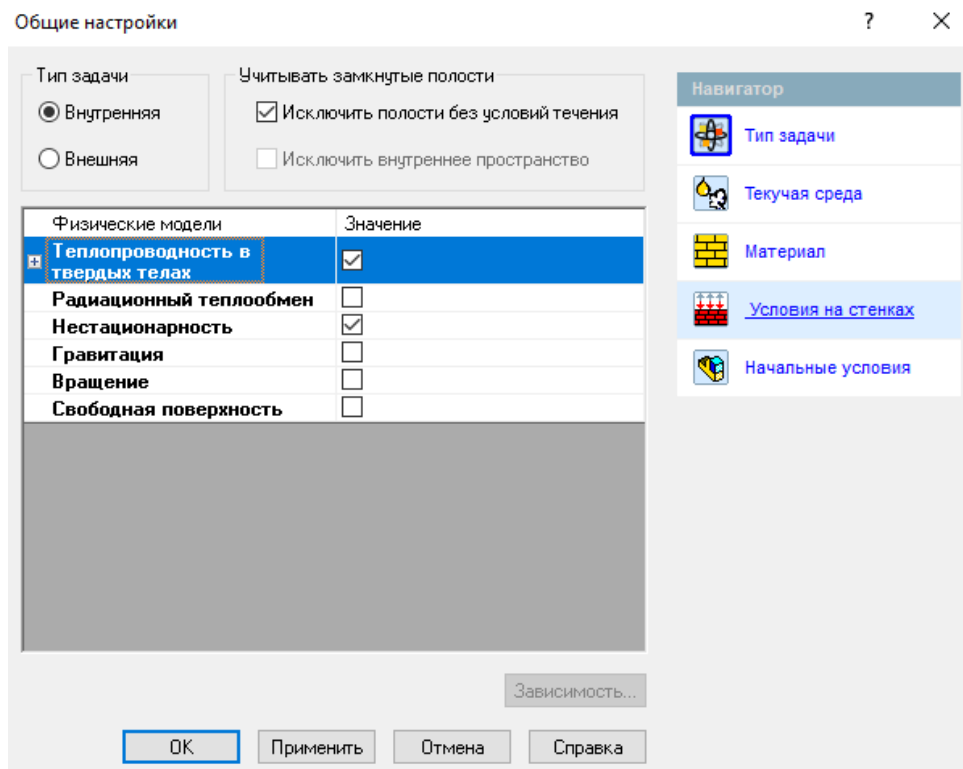


Рисунок В.1 – Выбор типа задачи

Далее необходимо в том же диалоговом окне выбрать задание текучей среды (рисунок В.2). В данном случае текучие среды – это воздух и продукты сгорания топлива. Тип течения – ламинарное и турбулентное.

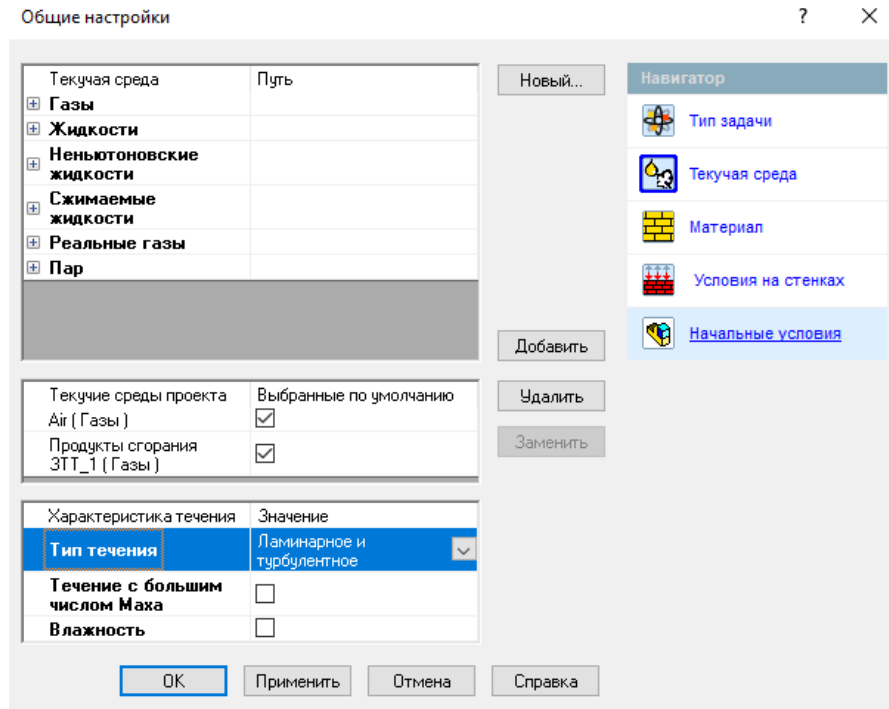


Рисунок В.2 – Выбор задания текучей среды

Для моделирования максимальных уровней нагрева конструкции детали «Корпус» необходимо определить начальные условия работы детали (рисунок В.3). Задаем начальную температуру и давление, параметры турбулентности задаются автоматически по длине газового тракта 3Д модели.

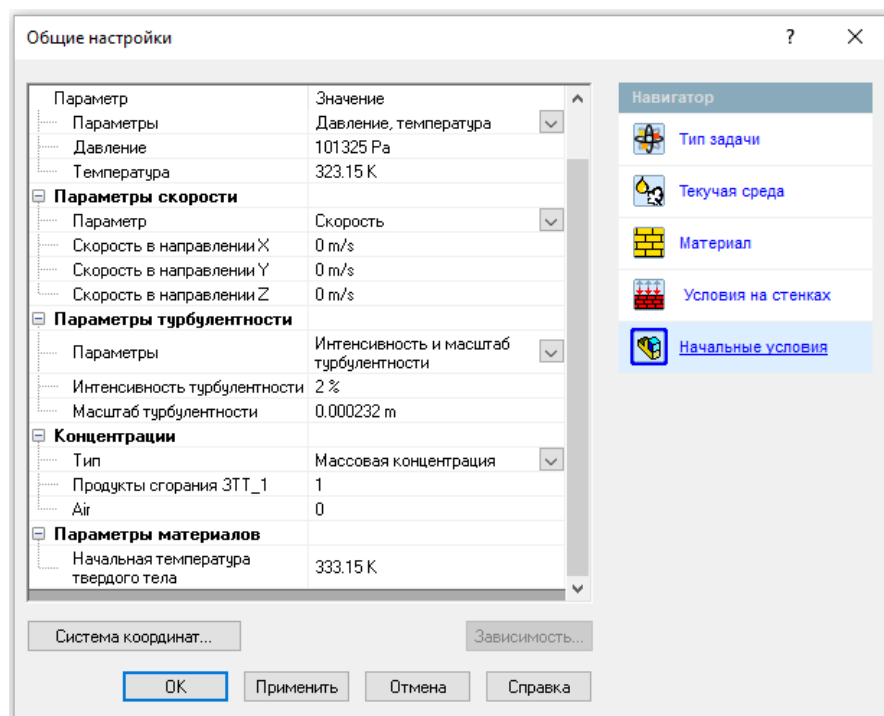


Рисунок В.3 – Начальные условия работы детали «Корпус»

Деталь «Корпус» изготовленная по традиционной технологии состоит из трех материалов: стальной корпус, молибденовая пластина и медный припой. В программе необходимо задать теплофизические характеристики для каждого материала из базы данных. На рисунке В.4 и В.5 приведены теплофизические характеристики и выбор области материала (выделен синим) стального корпуса.

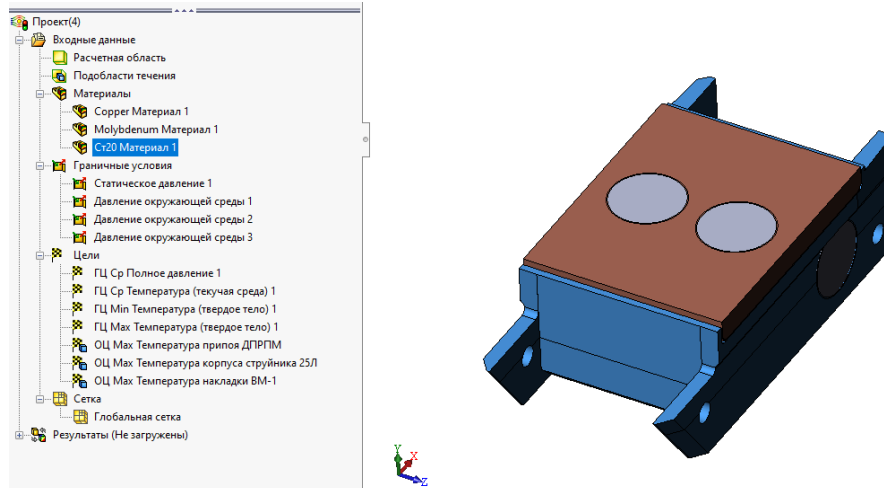


Рисунок В.4 – Выбор материала стального корпуса (выделено синим)

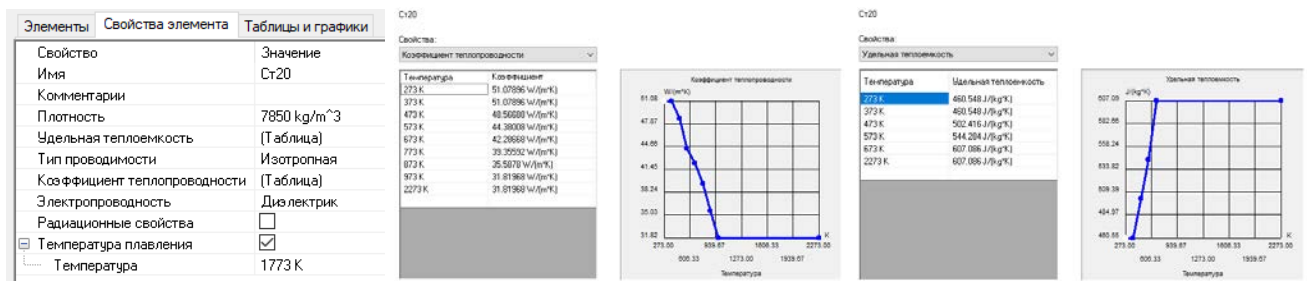


Рисунок В.5 – Теплофизические характеристики материала стального корпуса

На рисунке В.6 и В.7 приведены теплофизические характеристики и выбор области материала (выделен синим) молибденовой пластины.

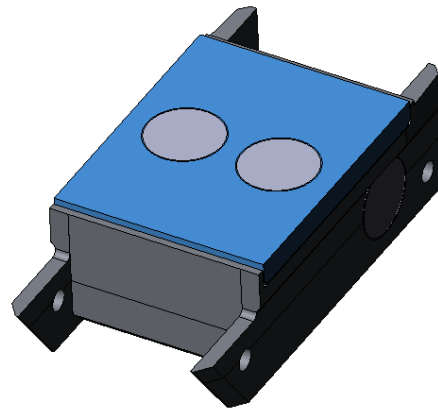
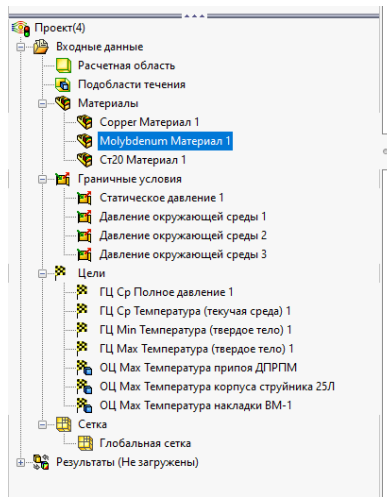
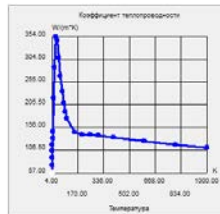


Рисунок В.6 – Выбор материала молибденовой пластины (выделено синим)

Элементы	Свойства элемента	Таблицы и графики
Свойство	Значение	
Имя	Molybdenum	
Комментарии		
Плотность	10200 kg/m ³	(Таблица)
Удельная теплоемкость		(Таблица)
Тип проводимости	Изотропная	
Кoeffициент теплопроводности		(Таблица)
Электропроводность	Проводник	
Удельное сопротивление		(Таблица)
Радиационные свойства		
Температура плавления	<input checked="" type="checkbox"/>	
Температура	2896.15 K	

Температура	Кoeffициент
4 K	57 W/(m·K)
5 K	74 W/(m·K)
6 K	90 W/(m·K)
7 K	105 W/(m·K)
8 K	118 W/(m·K)
9 K	132 W/(m·K)
10 K	146 W/(m·K)
15 K	220 W/(m·K)
20 K	287 W/(m·K)
30 K	354 W/(m·K)
40 K	385 W/(m·K)
50 K	397 W/(m·K)
60 K	357 W/(m·K)
70 K	234 W/(m·K)
80 K	209 W/(m·K)
90 K	185 W/(m·K)



Температура	Удельная теплоемкость
1 K	0.02 J/(kg·K)
2 K	0.04 J/(kg·K)
3 K	0.065 J/(kg·K)
4 K	0.09 J/(kg·K)
5 K	0.13 J/(kg·K)
10 K	0.46 J/(kg·K)
15 K	1.09 J/(kg·K)
20 K	2.0 J/(kg·K)
40 K	23.6 J/(kg·K)
60 K	104 J/(kg·K)
100 K	193 J/(kg·K)
150 K	230 J/(kg·K)
200 K	254 J/(kg·K)
300 K	276 J/(kg·K)
1000 K	294 J/(kg·K)

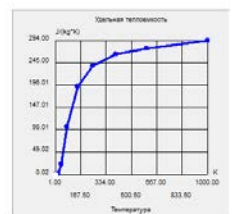


Рисунок В.7 – Теплофизические характеристики материала молибденовой пластины

На рисунке В.8 и В.9 приведены теплофизические характеристики и выбор области материала (выделен синим) медного припоя.

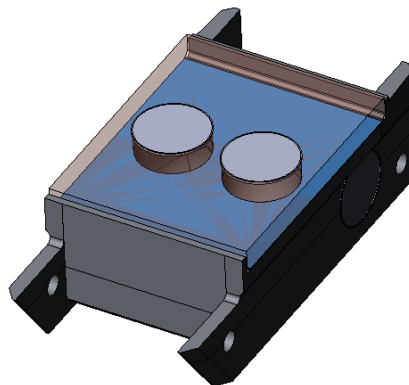
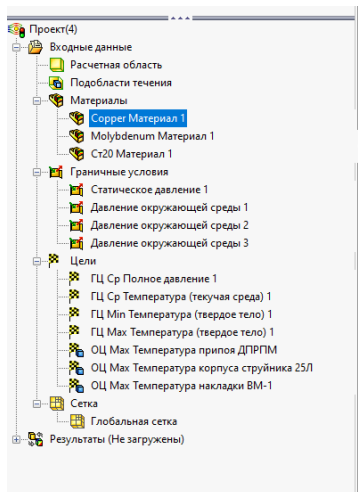


Рисунок В.8 – Выбор материала медного припоя (выделено синим)

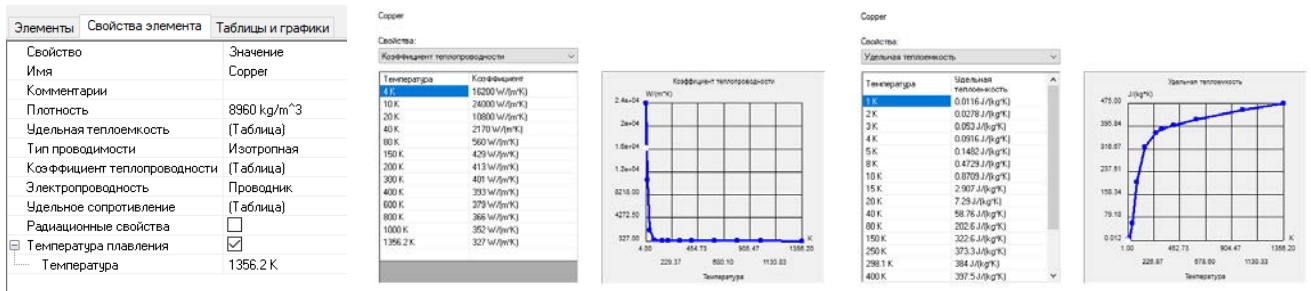


Рисунок В.9 – Теплофизические характеристики материала медного припоя

Задаем подобласти течения в каналах детали «Корпус». На рисунке В.10 приведена подобласть течения воздуха в канале. По 3Д модели выбираем полость канала течения и назначаем «Газ» (воздух).

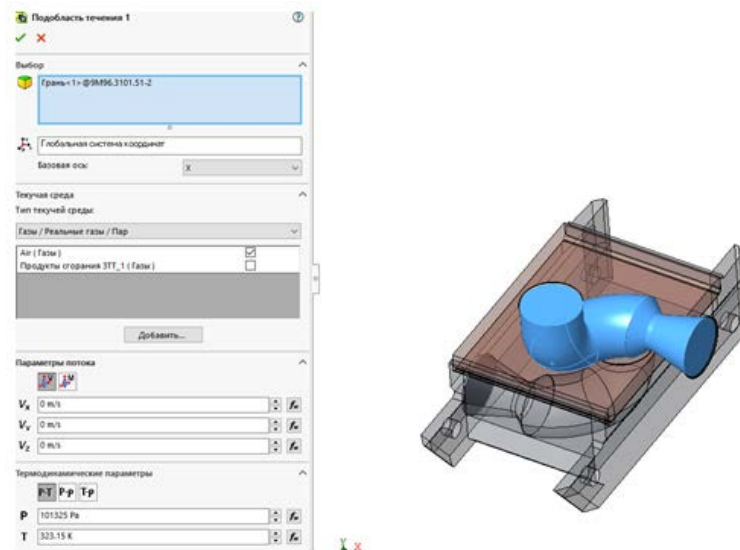


Рисунок В.10 – Назначение подобласти течения воздуха в канале

На рисунке В.11 приведены теплофизические характеристики воздуха согласно базы данных программы.

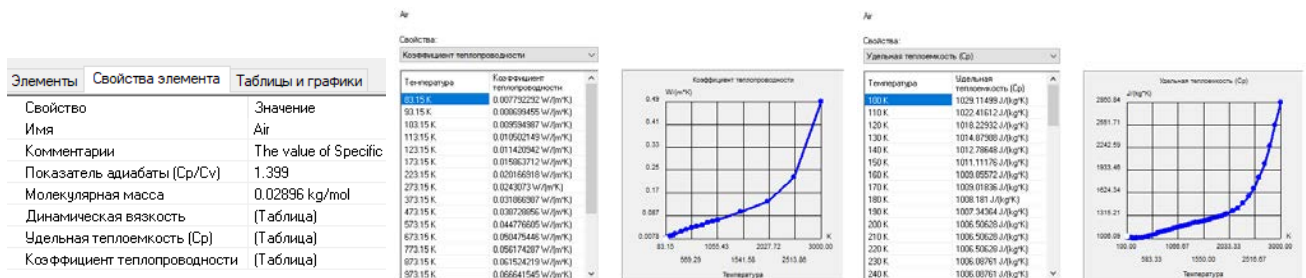


Рисунок В.11 – Теплофизические характеристики воздуха

На рисунке В.12 приведена подобласть течения горячего газа в канале. По 3Д модели выбираем полость канала течения и назначаем «Газ» (продукты сгорания топлива).

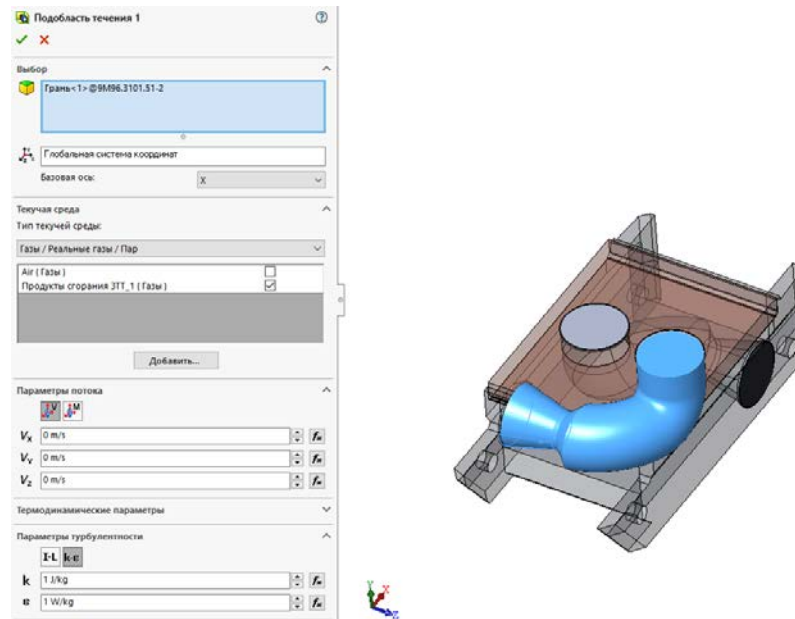


Рисунок В.12 – Назначение подобласти течения горячего газа в канале

В «Свойствах элементов» вводили значения теплофизических характеристик продуктов сгорания топлива согласно справочникам.

Задаем граничные условия работы детали «Корпус». Всего четыре граничных условия, два на входе в канал и два на выходе. Выбираем области граничных условий. Для граничного условия №1 на входе в канал 1 задаем «Статическое давление», для условия №2 на выходе из канала 1 «Давление окружающей среды». Параметр пограничного слоя – турбулентный.

Термодинамические параметры горячих газов на входе в канал (граничное условие 1): $T_{гг} = 1703 \text{ К}$ ($\sim 1427 \text{ }^\circ\text{C}$), $P_{гг} = 14964948 \text{ Па}$ ($\sim 148 \text{ атм}$).

Термодинамические параметры горячих газов на выходе из канала (граничное условие 2): $T_{гг} = 323 \text{ К}$ ($\sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$), $P_{гг} = 101300 \text{ Па}$ (1 атм).

На рисунках В.13 и В.14 изображены назначения граничных условий №1 на входе в канал 1 и граничного условия №2 на выходе из канала 1.

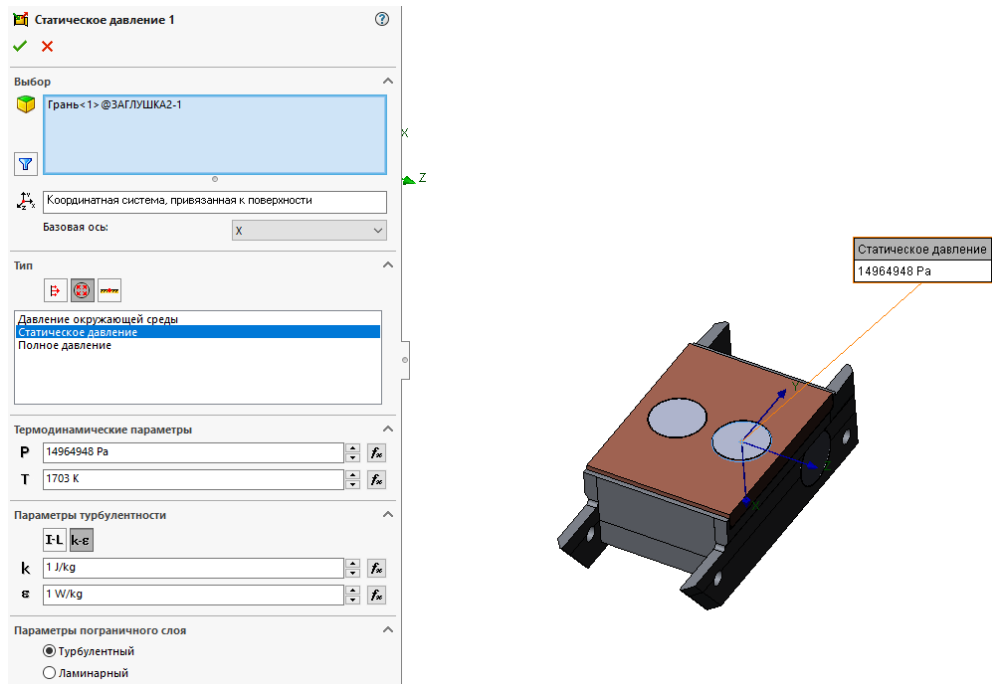


Рисунок В.13 – Назначение граничного условия №1 на входе в канал 1

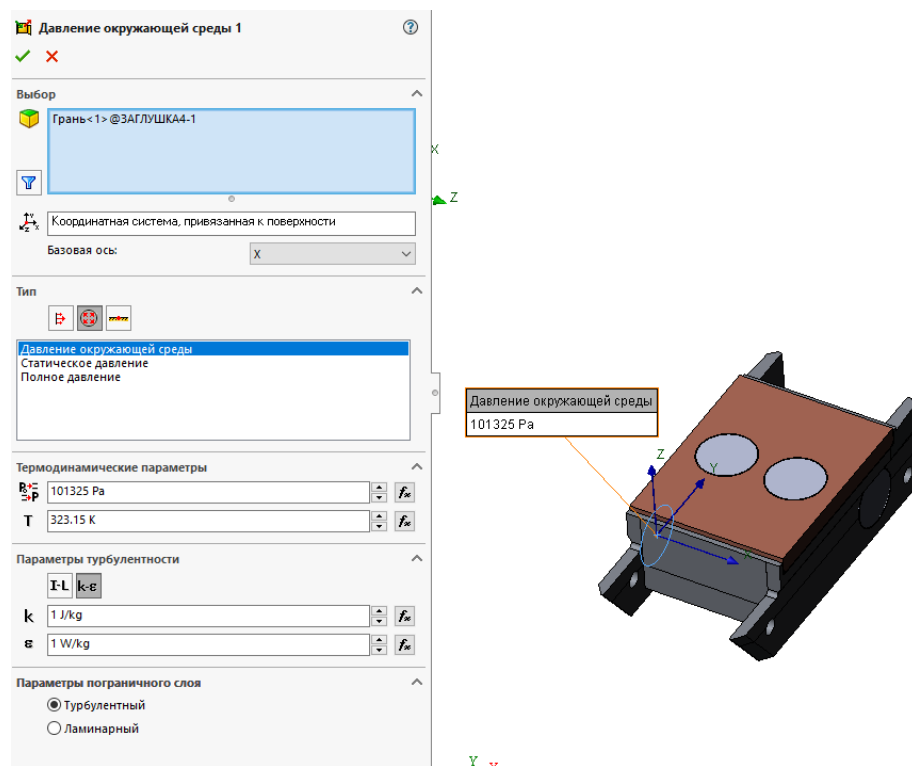


Рисунок В.14 – Назначение граничного условия №2 на выходе из канала 1

Для граничного условия №3 на входе в канал 2 задаем «Давление окружающей среды», для условия №4 на выходе из канала 2 «Давление окружающей среды». Параметр пограничного слоя – ламинарный.

Термодинамические параметры воздуха на входе и выходе из канала (граничные условия 3, 4): $T_B = 323 \text{ K}$ ($\sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$), $P_B = 101300 \text{ Па}$ (1 атм).

На рисунках В.15 и В.16 изображены назначения граничных условий №3 на входе в канал 2 и граничного условия №4 на выходе из канала 2.

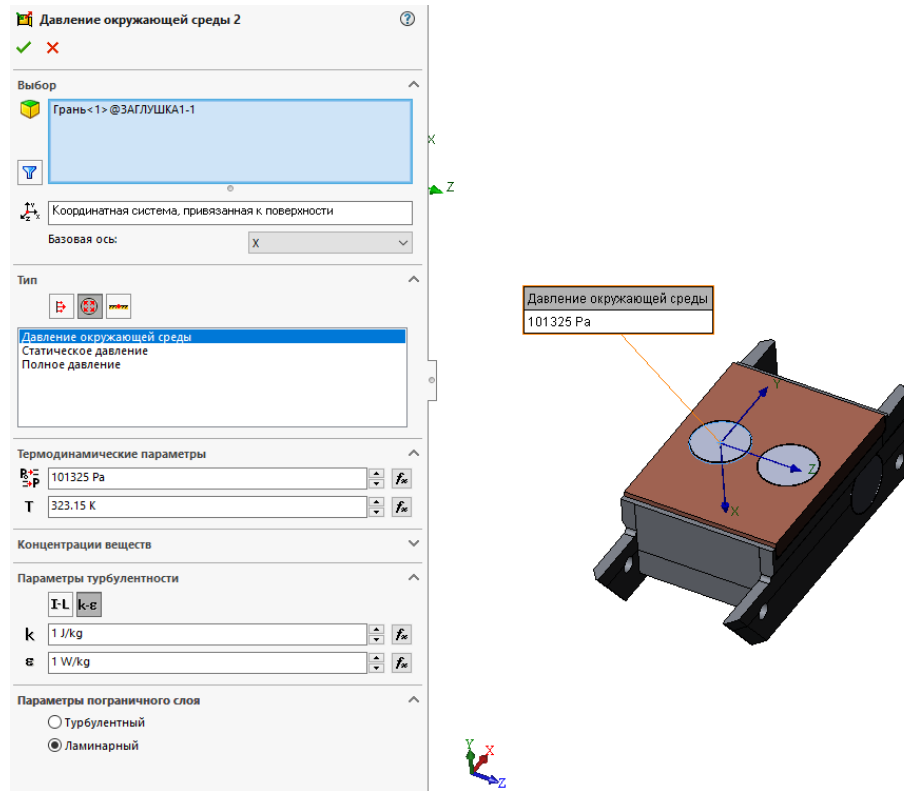


Рисунок В.15 – Назначение граничного условия №3 на входе в канал 2

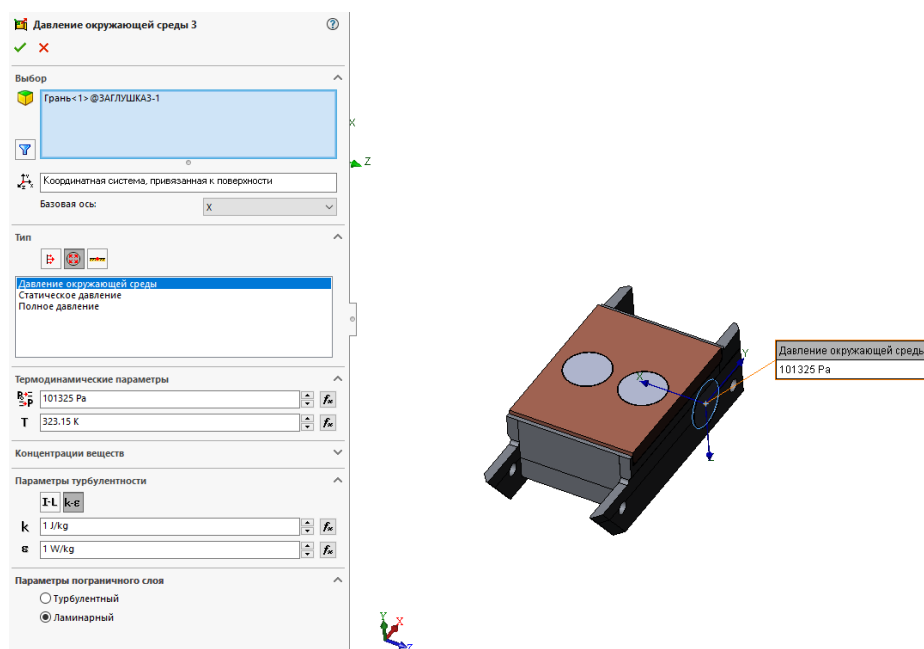


Рисунок В.16 – Назначение граничного условия №4 на выходе из канала 2

Начальная температура материалов конструкции детали «Корпус»: $T_0(x,y,z) = 333 \text{ K}$ ($\sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$).

Моделирование распределения температур с учетом постоянно изменяющихся граничных условий проходит на отдельном участке (сетке).

Построение сетки происходило в автоматическом режиме модуля «Глобальная сетка» Flow Simulation, при котором генерация сетки определяется числом ячеек базовой сетки, настройками дробления (наименьший размер ячеек, которые могут получиться в результате дробления) и процедурой разрешения узких каналов модели. На рисунке В.17 представлены настройки «Глобальной сетки» в автоматическом режиме (деталь «Корпус» без каналов – «твердое тело») и настройки «Локальной сетки» в ручном режиме. Локальная сетка строится в каналах детали «Корпус». Для этого задаем дробление ячеек в каналах.

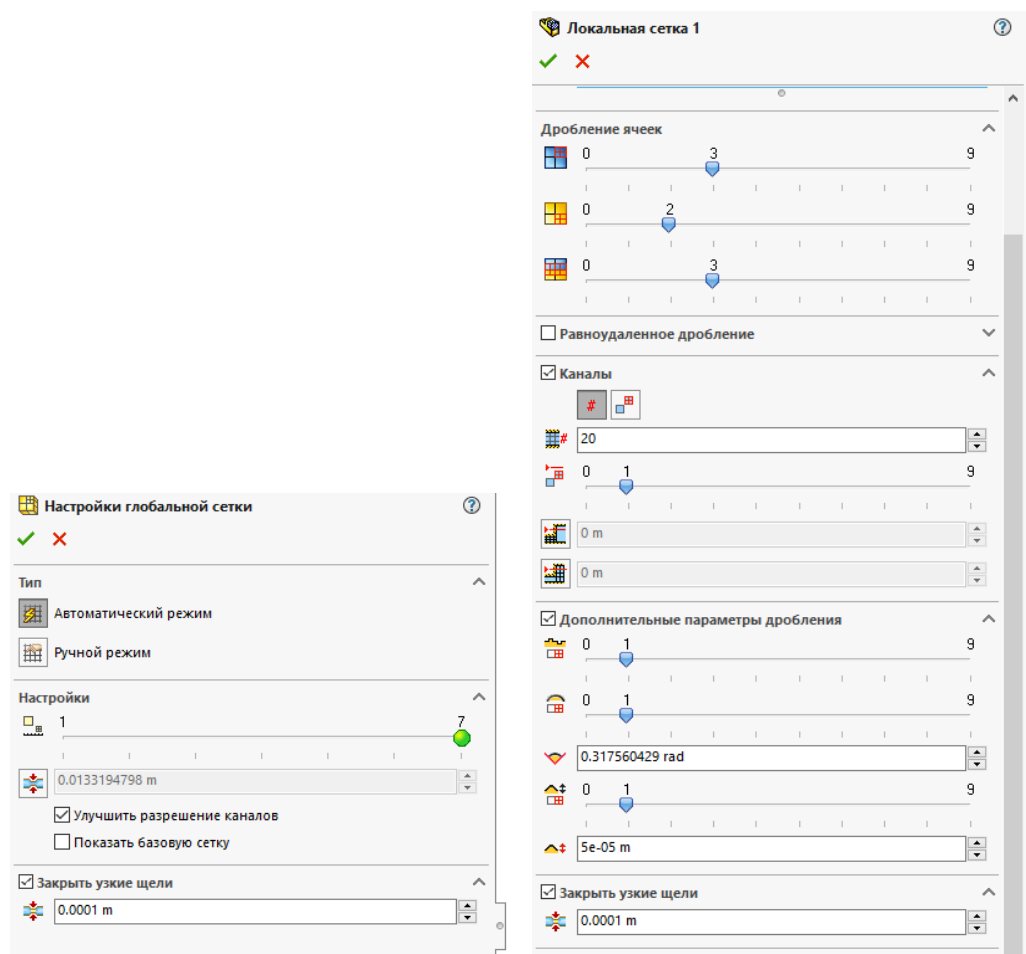


Рисунок В.17 – Настройки «Глобальной сетки» (слева) и «Локальной сетки» (справа)

После назначений всех граничных условий и настройки «сетки» моделирования ввести параметры расчета. В диалоговом окне «Опции управления расчетом» во вкладке «Завершение» необходимо ввести время расчета. Проводилось несколько вариантов моделирования с завершением 2 секунды (рисунок В.18) и 6 секунд. Во вкладке «Расчет» выбираем «Стационарный расчет в твердом теле» (рисунок В.19).

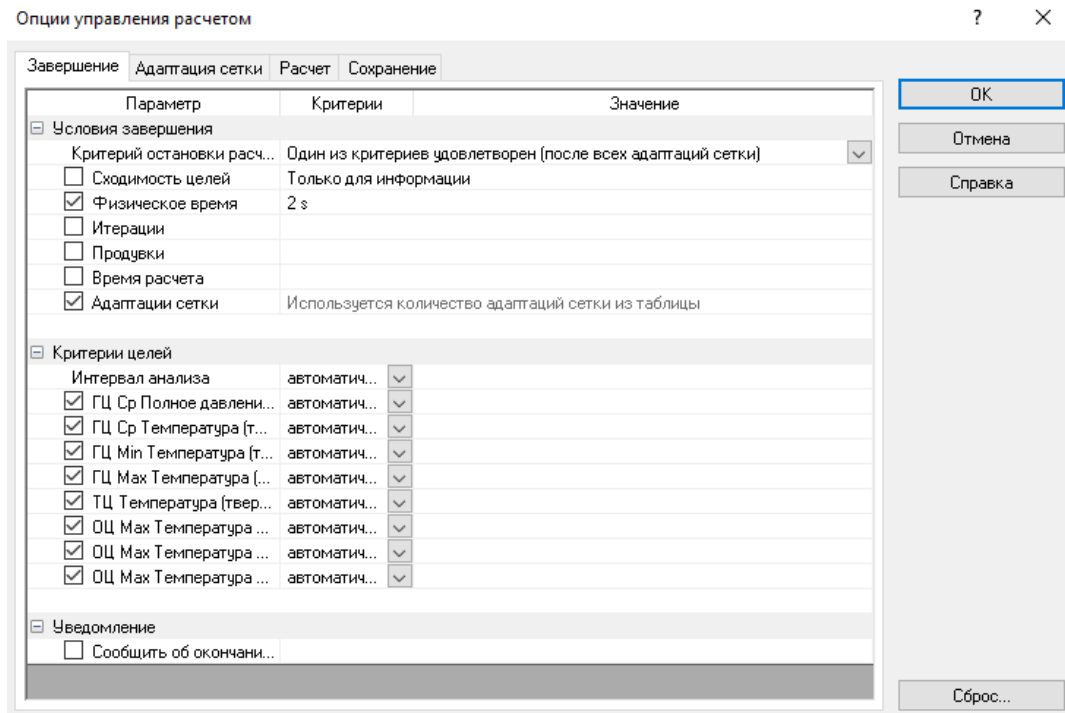


Рисунок В.18 – Условия завершения моделирования

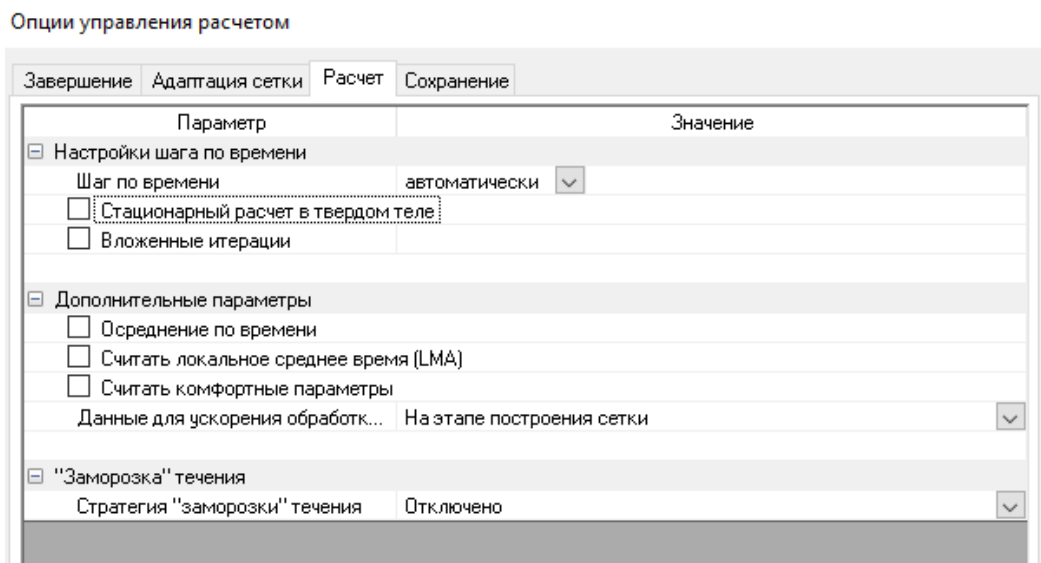


Рисунок В.19 – Настройки управления расчетом

Также необходимо ввести параметры для сохранения результатов моделирования, для этого во вкладке «Сохранение» выбираем сохранить резервные файлы и назначаем периодические выбранные параметры (рисунок В.20) в данном случае это время (начальный момент 0 секунд, период 0,1 секунды).

Опции управления расчетом

Завершение		Адаптация сетки		Расчет		Сохранение	
Параметр							Значение
[-] Резервные файлы							
<input checked="" type="checkbox"/>	Сохранить перед выполнением адаптации сетки						
<input checked="" type="checkbox"/>	Сохранять резервный файл ч...						100 Итерации
[-] Все результаты							
<input checked="" type="checkbox"/>	Периодически						Физическое время [s]
	Стартовый момент						0 s
	Период						0.1 s
<input type="checkbox"/>	Таблично						Итерации
[-] Выбранные параметры (нестационарный обозреватель)							
<input checked="" type="checkbox"/>	Периодически						Итерации
	Стартовый момент						0
	Период						5
	Параметры						(Температура (текущая среда), Температура (твердое тело), Темп... [...]

Рисунок В.20 – Настройки сохранения результатов моделирования

По результатам моделирования построен график изменения максимальной температуры элементов детали «Корпус» в зависимости от времени работы с помощью которого можно прогнозировать работоспособность детали «Корпус» в зависимости от технологии ее изготовления (по традиционной технологии с помощью пайки или предложенной с помощью коаксиальной лазерной наплавки).

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Методика и расчет стоимости изготовления биметаллической детали «Корпус» по традиционной и предложенной технологиям

Стоимость изготовления биметаллической детали «Корпус» по традиционной технологии с помощью пайки рассчитывается по формуле

$$C_{\text{из.тт.}} = C_{\text{ПКИ}} + C_{\text{мп}} + C_{\text{усл}} + C_{\text{м.о.}} \quad (\text{Г.1})$$

где $C_{\text{из.тт.}}$ – стоимость изделия, изготовленного по традиционной технологии;

$C_{\text{ПКИ}}$ – стоимость покупных комплектующих изделий;

$C_{\text{мп}}$ – стоимость изготовления молибденовой пластины и медного припоя;

$C_{\text{усл}}$ – стоимость услуг по диффузионной вакуумной пайке;

$C_{\text{м.о.}}$ – стоимость механической обработки изделия.

Стоимость изготовления биметаллической детали «Корпус» по комбинированной технологии с помощью коаксиальной лазерной наплавки рассчитывается по формуле

$$C_{\text{из.кт.}} = C_{\text{ПКИ}} + C_{\text{усл}} + C_{\text{м.о.}} \quad (\text{Г.2})$$

где $C_{\text{из.кт.}}$ – стоимость изделия, изготовленного по комбинированной технологии;

$C_{\text{ПКИ}}$ – стоимость покупных комплектующих изделий;

$C_{\text{усл}}$ – стоимость услуг по коаксиальной лазерной наплавке;

$C_{\text{м.о.}}$ – стоимость механической обработки изделия.

Стоимость машино-часа рассчитывается по формуле

$$C_{\text{мч}} = A_{\text{м.отч}} + C_{\text{ээ}} + P_{\text{ис}} + C_{\text{ор}} \quad (\text{Г.3})$$

где $C_{\text{мч}}$ – стоимость машино-часа;

$A_{\text{м.отч}}$ – объём амортизационных отчислений за час эксплуатации при условии 100% загрузки оборудования;

$C_{\text{ээ}}$ – стоимость электроэнергии;

$P_{\text{ис}}$ – расход инструмента и СОЖ;

$C_{\text{ор}}$ – стоимость обслуживания и ремонта оборудования.

Амортизационные отчисления за час эксплуатации при условии 100% загрузки оборудования рассчитывается по формуле

$$А_{\text{отч}} = C_{\text{об}} / C_{\text{р ам}} / C_{\text{сред р.д.}} / (K\text{-во}_{\text{см}} * K\text{-во}_{\text{ч}}) \quad (\text{Г.4})$$

где $C_{\text{об}}$ – стоимость оборудования;

$C_{\text{р ам}}$ – срок амортизации;

$C_{\text{сред р.д.}}$ – среднее количество рабочих дней в году;

$K\text{-во}_{\text{см}}$ – кол-во смен в рабочем дне;

$K\text{-во}_{\text{ч}}$ – кол-во часов в смене.

Стоимость электроэнергии вычисляется по формуле

$$C_{\text{ээ}} = C_{\text{кВтч}} * M_{\text{об}} \quad (\text{Г.5})$$

где $C_{\text{ээ}}$ – стоимость электроэнергии;

$C_{\text{кВтч}}$ – стоимость киловатт-часа;

$M_{\text{об}}$ – потребляемая мощность оборудования.

Стоимость расходуемого инструмента в процессе механической обработки рассчитывается по формуле

$$P_{\text{ис}} = C_{\text{рм}} / V_{\text{р из}} \quad (\text{Г.6})$$

где $C_{\text{рм}}$ – стоимость инструмента и расходных материалов;

$V_{\text{р из}}$ – время износа.

Затраты на обслуживание и ремонт оборудования вычисляются по формуле

$$C_{\text{ор}} = C_{\text{фор}} / C_{\text{сред р.д.}} * (K\text{-во}_{\text{см}} * K\text{-во}_{\text{ч}}) \quad (\text{Г.7})$$

где $C_{\text{ор}}$ – стоимость обслуживания и ремонта;

$C_{\text{фор}}$ – стоимость фактически произведённых за прошедший год работ по обслуживанию и ремонту оборудования;

$C_{\text{сред р.д.}}$ – среднее количество рабочих дней в году;

$K\text{-во}_{\text{см}}$ – кол-во смен в рабочем дне;

$K\text{-во}_{\text{ч}}$ – кол-во часов в смене.

Стоимость изготовления молибденовой пластины и медного припоя рассчитывается по формуле

$$C_{мп} = (T_{раб.} * O_{ср} * V_{соц.}) + (T_{раб.} * C_{м-ч} * K_{исп.}) + Mat. \quad (Г.8)$$

где $T_{раб.}$ – трудозатраты на изготовление детали;

$O_{ср.}$ – средняя часовая ставка исполнителя работ;

$V_{соц}$ – взносы на социальное страхование (30,2%);

$K_{исп.}$ – коэффициент использования оборудования;

$Mat.$ – стоимость материалов.

Для расчетов применяли следующие исходные данные:

Стоимость стальной отливки (ПКИ) 1 650 руб.;

Стоимость материалов для изготовления молибденовой пластины и медного припоя составляет 300 руб.;

Стоимость услуг по вакуумной диффузионной пайке 2 266 руб./шт.;

Стоимость коаксиальной лазерной наплавки, включая молибденовый порошок составляет 6 950 руб./шт.;

Стоимость оборудования, применяемого для изготовления биметаллической детали «Корпус» 54 000 000 руб.;

Срок амортизации оборудования 10 лет;

Среднее кол-во рабочих дней в году 247 шт.;

Количество смен в рабочем дне 2 шт.;

Потребляемая мощность оборудования 58 кВт;

Стоимость 1 кВт электроэнергии для Общества (Предприятия где изготавливали биметаллическую деталь «Корпус») составляет 5,39 руб.;

Стоимость расходуемого инструмента в процессе механической обработки (режущий инструмент и СОЖ) составляет 5000 руб.;

Время износа инструмента 90 ч.

Стоимость ПКИ и услуг определена фактической стоимостью поставщиков и оказания услуг по результатам предыдущих договорных отношений.

Расчет амортизационных отчислений:

$$A_{\text{Мотч}} = C_{\text{об}} / C_{\text{р.ам}} / C_{\text{редр.д.}} / (K\text{-во}_{\text{см}} * K\text{-во}_{\text{ч}}) = 54000000 / 10 / 247 / (2 * 8) = 1\,366,4 \text{ руб.}$$

Расчёт стоимости электроэнергии на 1 час работы оборудования:

$$C_{\text{ээ}} = C_{\text{квтч}} * M_{\text{ст}} = 58 * 5,39 = 312,62 \text{ руб./ч.}$$

Расчёт стоимости расходуемого инструмента:

$$P_{\text{ис}} = C_{\text{рм}} / V_{\text{р.из}} = 5000 / 90 = 55,56 \text{ руб./ч.}$$

Расчёт стоимости обслуживания и ремонта:

$$C_{\text{ор}} = C_{\text{фор}} / C_{\text{редр.д.}} * (K\text{-во}_{\text{см}} * K\text{-во}_{\text{ч}}) = 2\,292\,160 / 247 / (8 * 2) = 580 \text{ руб./ч.}$$

Обслуживание и ремонт рассчитаны на основании фактических затрат за прошедший год в пересчёте на 1 час эксплуатации оборудования.

Расчёт стоимости 1 часа эксплуатации оборудования:

$$C_{\text{м-ч}} = A_{\text{Мотч}} + C_{\text{ээ}} + P_{\text{ис}} + C_{\text{ор}} = 312,62 + 1\,366,4 + 55,56 + 580 = 2\,314,57 \text{ руб./ч.}$$

Стоимость изготовления молибденовой пластины и медного припоя:

$$C_{\text{МК}} = (T_{\text{раб.}} * O_{\text{ср}} * V_{\text{соц.}}) + (T_{\text{раб.}} * C_{\text{м-ч}} * K_{\text{исп.}}) + \text{Мат.} = 7,17 \text{ чел.час.} * 591,76 \text{ руб./чел.час.} * 1,302 + (7,17 \text{ чел.час.} * 2\,314,57 \text{ руб./м.час.} * 0,8) + 300 \text{ руб.} = 19\,100,65 \text{ руб.}$$

Стоимость механической обработки детали «Корпус» изготовленной по традиционной технологии (пайка):

$$C_{\text{мех.тт.}} = (T_{\text{раб.}} * O_{\text{ср}} * V_{\text{соц.}}) + (T_{\text{раб.}} * C_{\text{м-ч}} * K_{\text{исп.}}) = (5,6 \text{ чел.час.} * 591,76 \text{ руб./чел.час.} * 1,302) + (5,6 \text{ чел.час.} * 2\,314,57 \text{ руб./м.час.} * 0,8) = 14\,683,91 \text{ руб.}$$

Расчет стоимости детали «Корпус» изготовленной по традиционной технологии с помощью пайки:

$$C_{\text{из.тт.}} = C_{\text{ПКИ}} + C_{\text{мп}} + C_{\text{усл}} + C_{\text{м.о.}} = 1\,650 \text{ руб.} + 19\,100,65 \text{ руб.} + 2\,266 \text{ руб.} + 14\,683,91 \text{ руб.} = 37\,700,56 \text{ руб.}$$

Стоимость механической обработки детали «Корпус» изготовленной по комбинированной технологии (лазерная наплавка):

$$C_{\text{мех.кт.}} = (T_{\text{раб.}} * O_{\text{ср}} * B_{\text{соц.}}) + (T_{\text{раб.}} * C_{\text{м-ч}} * K_{\text{исп.}}) = (2,66 \text{ чел.час.} * 591,76 \text{ руб./чел.час.} * 1,302) + (2,66 \text{ чел.час.} * 2\,314,57 \text{ руб./м.час.} * 0,8) = 12\,848,42 \text{ руб.}$$

Расчет стоимости изготовления детали «Корпус» по комбинированной технологии с помощью лазерной наплавки:

$$C_{\text{из.кт.}} = C_{\text{ПКИ}} + C_{\text{усл}} + C_{\text{м.о.}} = 1\,650 \text{ руб.} + 6\,950 \text{ руб.} + 12\,848,42 \text{ руб.} = 21\,448,42 \text{ руб.}$$