

На правах рукописи

УДК 621.375.826

Третьяков Роман Сергеевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ
МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ С КОАКСИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ
ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.02.07 – Технологии и оборудование механической и физико-
технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

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



Москва – 2014

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

ГРИГОРЬЯНЦ Александр Григорьевич

Официальные оппоненты: **ЯМПОЛЬСКИЙ Виктор Модестович** доктор
технических наук, профессор,
МГУПИ, кафедра «Информационное
обеспечение технологий соединения
материалов»

ПЕТРОВСКИЙ Виктор Николаевич
кандидат физико-математических наук, доцент,
Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»,
кафедра «Лазерная техника»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**,
г. Москва

Защита диссертации состоится «26» февраля 2014 г. в 14:30
на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим
направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Москов
государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Телефон для справок 8-499-267-09-63.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент

Михайлов В.П.



Актуальность проблемы

Интеграция экономики Российской Федерации в мировую систему делает исключительно актуальной проблему обеспечения конкурентоспособности отечественной высокотехнологической и наукоемкой продукции и, прежде всего, продукции отечественного машиностроения. В настоящее время в мире активно развиваются и внедряются технологии нанесения функциональных покрытий и восстановления изделий машиностроения.

В современном машиностроении становится все более острой проблема повышения срока службы быстроизнашивающихся деталей машин. В процессе эксплуатации наиболее часто износу подвергаются локальные участки рабочих поверхностей. В связи с этим не менее остро стоит проблема восстановления изношенных поверхностей при сохранении всех остальных параметров и характеристик детали. Поэтому изыскание и разработка высокопроизводительных методов, и технологических процессов упрочнения, и восстановления изношенных деталей, исследование их эксплуатационных характеристик является актуальной задачей.

Появление столь большого разнообразия способов упрочнения и восстановления связано с невозможностью удовлетворить одновременно большому количеству требований, часто противоречивых, налагаемых условиями эксплуатации поверхностей и технологией нанесения покрытий. Новые способы появляются для устранения или уменьшения противоречий между какими-либо двумя или более одновременно неудовлетворенными требованиями. Одна из заметных тенденций в развитии технологий упрочнения и восстановления поверхностей – уменьшение тепловложения при формировании поверхностного слоя. Это направление выразилось, в частности, в создании технологий плазменного напыления, еще более усилилось при создании технологий детонационного напыления и в настоящее время успешно развивается в разработке процессов вакуумно-плазменного напыления. С использованием технологий напыления удастся создавать не только металлические покрытия, но и металлокерамические, керамические и другие – такие, которые невозможно получить с использованием технологий наплавки. Универсальность технологий напыления, однако, ограничена невозможностью удовлетворить таким эксплуатационным критериям, как прочность сцепления с подложкой (адгезионная прочность), когезионная прочность, отсутствие пористости.

Традиционные способы наплавки со значительным перегревом металла и образованием металлургической связи с подложкой (при совместном плавлении и перемешивании) лишены недостатков процессов напыления, однако имеют ряд собственных недостатков, связанных с большим проплавлением основы и разбавлением наплавляемого металла основным. Таким образом, дальнейшее повышение эксплуатационных свойств покрытий во многом связано с разрешением противоречия между необходимостью создавать эти покрытия при существовании единой жидкой ванны основного и присадочного металлов с одной стороны и необходимостью минимизировать перегрев этой ванны - с

другой. При таких условиях возможно формирование композиционной структуры, которую можно рассматривать как промежуточную между литой и напыленной.

Использование высококонцентрированных источников тепла, таких как электронный и лазерный лучи, для преодоления выделенного противоречия является одним из перспективных решений. В России и за рубежом сейчас активно разрабатываются способы лазерной поверхностной обработки материалов: термической обработки, легирования, аморфизации и наплавки. Известны работы многих отечественных и зарубежных ученых, например, Морозов В.П., Мисюров А.И., Смулов А.И., J.T.M. De Hosson.

Однако до настоящего времени комплексного исследования технологических особенностей процесса лазерной модификации не проводилось, что затрудняло применение этих технологий в производстве. В связи с этим постановка данной работы является весьма актуальной.

Цель данной работы – разработка метода и устройства для получения износостойкого покрытия путем создания методики проектирования технологической оснастки и изучения влияния параметров технологического процесса на лазерную модификацию поверхностей.

В работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Создание методики математического моделирования процесса коаксиальной подачи порошковых материалов.
2. Разработка технологической оснастки для получения покрытий методом коаксиальной подачи материалов на экспериментальном стенде на основе результатов моделирования.
3. Исследование влияния параметров технологического процесса на формирование покрытий и создание методики выбора параметров процесса.
4. Проведение выбора материалов для современного машиностроения, исследование их металлографических свойств при получении покрытий с помощью лазерного излучения.
5. Исследование структур и свойств полученных покрытий с целью выбора типа покрытия для применения в изделиях судостроительной промышленности.
6. Проведение испытаний выбранного типа покрытия на деталях судовой запорной арматуры паровой системы охлаждения атомного реактора корабля.

Научная новизна работы

1. Расчетным путем установлено, что оптимальным фракционным составом газопорошкового потока являются частицы размерами от 20 до 120 мкм. Нижний предел обусловлен рассеиванием направленного потока частиц и нарушением стабильного формирования единичного валика. Верхний предел связан с нестабильностью расплавления частиц большой массы.

2. Расчетным путем установлено, что при угле схождения газопорошкового потока 52 градуса достигается минимальный диаметр сфокусированного газопорошкового потока, обеспечивающий минимальную

ширину единичного валика, а при угле схождения в 64 градуса достигается максимальная производительность процесса лазерной модификации поверхностей, при этом ширина валика больше диаметра расплавленной лазерным лучом ванны.

3. Экспериментально установлено, что в среднем, при лазерном модифицировании поверхности, пористость нанесенных покрытий составляет около 2%, что укладывается в допустимый диапазон различных отраслевых стандартов. Крупные поры неправильной формы на поперечных и продольных шлифах свидетельствуют о нестабильном режиме расплавления попадающего в валик порошкового материала. В таких случаях необходимо увеличивать погонную мощность лазерного излучения, однако при этом возрастает глубина подплавления основного материала и перемешивание порошкового и основного материала подложки, что может сказаться на эксплуатационных свойствах нанесенного покрытия.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. На основании численного моделирования и проведенных исследований спроектированы сопла, позволяющие получать стабильное истечение газопорошковой струи с диапазоном скорости потока от 1 до 6,5 м/с для частиц с фракционным составом от 20 до 120 мкм.

2. Установлено, что для спроектированных сопел зазор от среза сопла до перетяжки газопорошкового потока снижается линейно при увеличении расхода газа в диапазоне 7 до 13 мм и является минимальным для частиц размерами 120 мкм, что связано с массой частиц.

3. Установлено, что использование сопла с углом схождения газопорошкового потока 52 градуса и порошковых частиц размерами от 20 до 60 мкм позволяет получить минимальный диаметр порошковой струи до значения 1 мм, это позволяет локально наносить покрытия на участках небольших геометрических размеров.

4. Получены оптимальные режимы нанесения покрытий различного класса (40X13, 0X17, Stellite 6, P6M5, CuSn11, ПГ-CP3), которые позволяют получить поверхностный слой с минимальной зоной перемешивания основного материала с присадочным, составляющей от 2 до 30 мкм, что позволяет наносить покрытия с высокими эксплуатационными свойствами.

5. На основании проведенных исследований для нанесения уплотняющего покрытия на запорную арматуру паровой системы охлаждения атомного реактора корабля был выбран материал покрытия – Stellite 6, отвечающий всем предъявляемым к нему требованиям и разработана технология нанесения покрытия на опытно-штатные детали.

Методы исследования

Для решения поставленных задач применялись экспериментальные и теоретические методы исследований. Для математического моделирования процесса коаксиальной подачи порошковых материалов использовали стандартный программный комплекс Fluent 14.5. Измерение пространственных и энергетических параметров лазерного пучка осуществляли с применением

калориметрического измерителя Ophir 5000-LW, диагностической системой лазерного пучка LASERSCOPE UFF100 фирмы Prometec.

Для проведения металлографических исследований использовалось следующее оборудование: отрезные станки ISOMET 4000, Wirtz-Buehler GmbH, MICROMET M3/200-SAS, установки для заливки образцов SIMPLIMET 1000, Wirtz-Buehler GmbH, установки для полировки и шлифования образцов PHOENIX 4000/4000 V, Wirtz-Buehler GmbH, APOL LS2/LSA6-40-SAS, микроскопы Leica MZ125, NIKON MA200, электронные весы BP 121S. Исследование микроструктуры и размера зерен поверхностного слоя шлифов проводилось при увеличении от 50х до 1000х, в зависимости от размера исследуемых слоев с использованием следующих методов:

- определением структурно-фазовых составляющих сравнением с эталонными составляющими структуры: для стальной основы по ГОСТ 8233, для покрытий на основе цветных металлов по ГОСТ 21073.1,
- определением количественного состава структурно-фазовых составляющих по точечному методу А.А. Глаголева с использованием лицензионного программного обеспечения NIKON NIS-ELEMENTS,
- методом подсчета количества зерен, приходящихся на единицу поверхности шлифа, с определением среднего диаметра и средней площади зерен по ГОСТ 5639.

Микротвердость покрытий исследовалась по толщине покрытия и в переходной зоне от покрытия к основному металлу по методике, предназначенной для определения твердости тонких поверхностных слоев и покрытий при испытательных нагрузках от 0,09807 до 1,961 Н. Методика соответствует ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 «Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения» и ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников». Шероховатость испытуемой поверхности изделия (образца) была не грубее $Ra = 0,32$ мкм, определяемой по ГОСТ 2789.

Ускоренные испытания на стойкость к питтинговой коррозии проводились химическим методом по ГОСТ 9-912-89. Испытания на стойкость к межкристаллитной коррозии проводились методом АМУ, ГОСТ 6032-03 без провоцирующего нагрева в кипящем растворе сернистой меди и серной кислоты в присутствии металлической меди (стружки) в течение 8 часов.

Планирование экспериментов и статистическую обработку экспериментальных данных проводили в программе Microsoft Excel.

Достоверность

Достоверность полученных результатов обеспечена корректным использованием общих положений фундаментальных наук (уравнения баланса энергии, теплопереноса и т.д.), проверена по известным критериям изучаемых процессов и подтверждена экспериментальными данными, обработанными с помощью методов статистического анализа.

Апробация работы

Результаты работы доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» ФГБОУ ВПО МГТУ имени

Н.Э. Баумана (Москва, 2010, 2011, 2012, 2013), Российско-Французской конференции молодых ученых (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, апрель 2009), Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии» (Москва, апрель 2013), 15-ой международной ежегодной научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика» (Санкт-Петербург, апрель 2013).

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 12 научных работ, из них 6 статей – в ведущих научных рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Также при выполнении диссертационной работы был получен патент на изобретение и подана заявка на патент на полезную модель.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы из 79 наименований; содержит 158 страниц машинописного текста, 110 рисунков и 44 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, указаны цель работы, научная новизна, практическая ценность работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе литературных данных приведен обзор области применения лазерной модификации поверхности, в части метода подачи порошковых материалов.

Главным фактором, определяющим применимость технологии, является проектирование оснастки для процесса. Существует несколько основных методов подачи порошкового материала (Рис. 1) одновременно с лазерным излучением:

1. Боковая подача порошка – через трубку подается порошковый поток в центр или хвост сварочной ванны.
2. Многоструйная подача порошка – 3 и большее количество порошковых потоков без пересечения и закрутки подаются в зону лазерного воздействия.
3. Непрерывная коаксиальная порошковая подача – создается газопорошковый конус, соосный с лазерным лучом.



Рис. 1. Способы порошковой подачи порошка

Наиболее простой метод подачи порошка – боковая подача. Такой подход используется для получения покрытий простой формы и, как правило, по линейной траектории с невысокими требованиями к качеству поверхности. Недостатками метода является несимметричная схема подачи порошка и сравнительно низкие показатели качества поверхности: пористость, неравномерность толщины слоя. Кроме того, при боковой подаче порошка необходимо строго соблюдать положение сопла относительно направления движения.

Многоструйная подача порошка – развитый метод боковой подачи, который исключает недостатки классической боковой подачи благодаря осесимметричному расположению трубок относительно оси лазерного луча, что позволяет наносить покрытия по любой криволинейной траектории и в любом пространственном положении. Недостаток такого технологического решения – низкий коэффициент использования присадочного материала.

Наиболее универсальный метод подачи порошковых материалов в зону лазерного воздействия – коаксиальная (соосная) подача порошка в виде сфокусированного конуса на поверхности сварочной ванны. В этом случае, как правило, порошок подается через полость между двумя или тремя коническими поверхностями оснастки. Такая конструкция имеет чрезвычайно стабильные характеристики газопорошкового потока и позволяет с высоким коэффициентом использования порошкового материала наносить покрытия в любом пространственном положении. Оснастка позволяет получать покрытия с высокой плотностью, стабильной толщиной и является осесимметричной, т.е. нечувствительной к направлению движения при нанесении покрытия.

Недостатком такой оснастки является сложность её изготовления. Известно, что каждый порошковый материал имеет ряд параметров: размер фракций, форму частиц, насыпную плотность порошкового материала и т.д. Все они влияют на параметры газопорошкового конуса не меньше, чем геометрия технологической оснастки. В связи с этим разработка оснастки под наиболее широкий круг решаемых задач и используемых материалов является трудной задачей, над которой работает большое количество разработчиков во всем мире.

Опыт получения покрытий с боковой подачей присадочного порошка говорит о том, что энергетические параметры излучения влияют на качество и производительность процесса не однозначно. Другими словами, при достижении высокой производительности процесса необходимо следить за отсутствием брака в покрытиях. В свою очередь, залог сплошного равномерного покрытия без технологических дефектов, таких как трещины, поры и значительного перемешивания с основой – это сбалансированная технология получения одиночных валиков правильной геометрической формы.

Среди всего многообразия функциональных покрытий по способности воспринимать нагрузку со стороны окружающей среды необходимо выделить следующие:

- Износостойкие,
- Антифрикционные,

- Жаропрочные;
- Жаростойкие;
- Коррозионностойкие;
- Термостойкие;
- Эрозионностойкие;
- Вибрационностойкие.

Большая часть номенклатуры изделий современного машиностроения требует решения задачи по их комбинированной защите, что делает актуальным рассмотрение уникальных возможностей применения лазерного излучения. Варьирование параметров лазерного излучения позволяет получить оптимальные геометрические и структурные свойства покрытий: достичь минимального термического воздействия на основной металл, регулировать состав нанесенных слоев в локальных объемах, осуществить минимальное термическое воздействие на основной металл, что особенно важно для конструкционных сталей, претерпевающих фазовые и структурные превращения, минимизировать остаточные деформации обработанных деталей, наносить покрытия на изделия сложной геометрической формы или на участки с малыми размерами, повысить коэффициент использования порошка.

На основании анализа литературных данных сформулированы задачи исследования настоящей работы.

Во второй главе проведен анализ геометрии существующих типов сопел для коаксиальной подачи порошковых материалов, что позволило выделить наиболее важные для разработки геометрические и технологические параметры (Таблица 1). Как видно из таблицы, наиболее распространенными являются два вида сопел: с острым углом при вершине (менее 30 градусов) и развернутые (более 50 градусов).

Таблица 1.

Сводные данные о разработанных соплах для лазерной наплавки

Номер патента	Возможность регуливовки ширины валика	Сложность конструкции	Угол при вершине конуса	Применимость для нанесения различных покрытий
CN2510502Y	Нет	Высокая	60	Средняя
WO2005028151A1	Нет	Средняя	60	Средняя
US2006065650A1	Нет	Средняя	20	Низкая
US 2008/0308538	Да	Средняя	25	Высокая

Технология лазерного модифицирования поверхности требует сопла, настраиваемого в широких пределах размеров валиков для нанесения различных материалов с сохранением оптимальных свойств. В связи с этим и с учетом литературных данных, для определения оптимальной формы настраиваемого сопла для коаксиальной подачи порошкового материала было спроектировано для моделирования несколько вариантов сопел в виде пар насадок (внешняя/внутренняя) с целью поиска оптимального сочетания.

Для решения задачи проводилось моделирование течения потока газа через сопло в открытую среду. Давление внутри сопла данного типа остается равномерным, движение частиц ламинарным. Поскольку процессы подачи порошка и подачи газа являются стабильными, в расчете принималась следующая классификация данного потока (в соответствии с перечисленными):

- ламинарный;
- установившийся;
- сжимаемый;
- однородный;
- внутренний;

Транспортирующим газом является аргон, его количество регулируется через расход. В связи с этим использовались следующие граничные условия для сжимаемого потока: входной расход газа, выходное давление в дальней зоне. Значение входного расхода являлось варьируемым параметром, выходное давление является следствием неразрывности газопорошкового потока.

Расчетная программа Fluent, предназначена для моделирования сложных течений газов с широким диапазоном изменения свойств посредством обеспечения различных параметров моделирования и использования многосеточных методов с улучшенной сходимостью. Эта программа обеспечивает оптимальную эффективность и точность решения для широкого диапазона моделируемых скоростных режимов. Алгоритм расчета приведен в диссертации на Рис. 2.23.

При расчете спроектированной модели сопловой насадки задавались следующие параметры потока:

- расход газа – коаксиального с лазерным лучом и транспортирующего порошок;
- размер частиц порошка;
- начальная скорость впрыска частиц в сопловую насадку.

Для установленного диапазона определялись допустимые параметры сопла. Пересечение допустимых параметров – это область параметров режима, удовлетворяющих всем требованиям (диаметр газопорошковой струи и распределение частиц порошкового пятна в «перетяжке», расстояние от среза сопла до центра перетяжки).

В результате варьирования геометрии сопловых насадок были получены конечные геометрические размеры конструкций, которые удовлетворяют следующим условиям:

1. Получение требуемого технологией диаметра газопорошкового потока на приемлемом расстоянии от среза сопла: диаметр перетяжки потока должен составлять от 1 до 5 мм на расстоянии не менее 10 мм.
2. Получение стабильности истечения газопорошкового потока в диапазоне параметров потока: расходов газа, размера частиц.

Конечные геометрические размеры конструкций изображены на Рис. 2 и Рис. 3. Первая комбинация внешнее/внутреннее сопло представляет из себя пару конусов с углом при вершине 52 градуса, вторая комбинация – пару конусов с углом 64 градуса. Такой акцент на «тупые» сопла сделан по причине

необходимости удалить зону наплавки от среза инструмента как минимум на 10 мм. При этом диаметр пятна в зоне наплавки так же увеличится. Острые сопла не позволяют реализовать такие технологические решения в принципе.

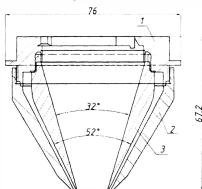


Рис. 2. Сечение экспериментального сопла №1, «длинное».

1- опора, 2 – сопло внешнее, 3 – сопло внутреннее

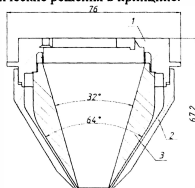


Рис. 3. Сечение экспериментального сопла №2, «короткое».

1- опора, 2 – сопло внешнее, 3 – сопло внутреннее

С учетом экспериментальных и литературных данных создана матрица планирования расчетов сопел с различными расходами газов (Таблица 2). Поскольку в расчетной схеме присутствуют два потока: ускоряющий частицы и коаксиальный, корректирующий поток, то задание газов в комбинации позволяет изменять форму газопорошкового потока в широких пределах.

Таблица 2.

Спланированная сетка экспериментов по продувке сопла				
Расход транспортирующего газа, л/мин				
	6	9	12	15
Расход коаксиального газа, л/мин				
3	1	3	5	7
6	2	4	6	8

Для 8 комбинаций расходов транспортирующего и коаксиального газов был проведен расчет газодинамики и моделирование газопорошкового потока через спроектированные сопла. В качестве присадочного материала впрыскивались никелевые порошки сферической формы с размерами 10, 20, 40, 60, 80, 100 и 120 мкм. Основной целью моделирования являлось исследование влияния параметров расхода газа и размера порошковых частиц на параметры газопорошковой струи для проведения дальнейших экспериментов. Для этого необходимо провести:

1. Измерение диаметра перетяжки газопорошкового потока.
2. Измерение зазора между срезом сопла и центром перетяжки газопорошкового потока.

3. Измерение скорости частиц в зоне лазерного воздействия при различных параметрах струи и частиц.

Как известно, при ламинарном истечении расход газа наиболее сильно влияет на скорость частиц, а значит, и на геометрические параметры газопорошковой струи. Исследование спроектированных сопел показало, что изменение расхода транспортирующего газа влияет на скорость частиц при истечении (см. диссертацию Рис. 2.29 и Рис. 2.30). С ростом расхода транспортирующего газа скорость частиц растет пропорционально расходу и слабо зависит от диаметра частиц в исследованном диапазоне.

Из графиков видно, что скорость частиц, как для одного сопла, так и для другого, стабильно растет с ростом расхода газа, причем независимо от диаметра частиц средняя скорость остается практически неизменной. Это означает, что скорость частиц в районе зоны обработки практически не изменяется при изменении размера частиц.

Размер частиц и их форма наиболее значительно влияет на параметры газопорошковой струи: слишком мелкие частицы не фокусируются, крупные - не применимы по технологическим причинам. Из литературы известно, что для любых типов сопел наиболее применимыми являются размеры частиц от 10 до 150 мкм.

Помимо общих закономерностей, в результате моделирования был установлен следующий факт, подтвержденный экспериментально, что для частиц никеля диаметром 20 мкм и менее даже при незначительных расходах коаксиального газа и любых расходах транспортирующего газа, несмотря на образование перетяжки газопорошкового потока, на оси обработки частиц не оказалось (см. диссертацию Рис. 2.35 и Рис. 2.36). Все частицы были отклонены коаксиальным газом от пересечения с осью лазерного луча. При обработке с таким набором параметров режима процесс нанесения порошковых материалов не происходит.

Третья глава посвящена исследованию влияния параметров режима на процесс модификации поверхностей. На основании выполненного численного расчета в предыдущей главе была спроектирована конструкция сопел для коаксиальной подачи порошковых материалов и выявлены основные характеристики поведения газопорошковой струи. При проведении дальнейших исследований по определению свойств покрытий, полученных методом лазерного поверхностного модифицирования, необходимо предварительно рассмотреть формирование единичных валиков в зависимости от параметров режима на одном порошковом материале, а также выработать методику определения оптимального режима нанесения в зависимости от параметров.

В настоящее время, несмотря на большое число экспериментальных работ и результатов по лазерному модифицированию поверхности пучками разных типов лазерных источников, практически отсутствуют исследования оптических свойств лазерных пучков. Измерения проводились с помощью диагностической системы лазерного пучка высокомошных лазеров LASERSCOPE UFF100. Принцип работы основан на регистрации лазерного излучения высокоскоростным фотодетектором, расположенным в основании

измерительной иглы. Измерения были проведены на выходе из транспортирующего волокна диаметром 100 мкм для волоконного лазера ЛС-4-К. Каустика сфокусированного пучка приведена в диссертации на Рис. 3.4.

В спроектированных с помощью численного моделирования технологических соплах реализовано изменение диаметра пучка лазерного излучения в плоскости обработки, а также изучено распределение излучения, параметры пучка и его характеристики. Проведен ряд экспериментов по нанесению единичных валиков на стальные подложки при изменяющемся диаметре пучка на поверхности обработки, что позволило установить, что ширина валика изменяется неоднозначно при изменении диаметра луча. Ширина валика обычно больше диаметра пучка, так как валик наращивается не только при прямом воздействии лазерного луча, но и в ширину, благодаря энергии, запасённой расплавленным металлом. Высота валика также зависит от ряда параметров, поэтому прогнозировать можно лишь качественное изменение выходных величин в зависимости от входных.

Кроме того, для каждого сопла, очевидно, существует оптимальное положение, позволяющее получать валики с наименьшими затратами порошкового материала и наибольшими размерами валиков с сохранением их правильной геометрической формы.

Проведенные эксперименты позволяют сделать ряд выводов:

1. Получение валиков лазерной обработкой порошковых материалов в зафокальной плоскости приводит к повышению коэффициента использования порошка: ширина валика растёт, а высота остается примерно постоянной.
2. Для каждого сопла существует оптимальное положение газопорошковой струи относительно лазерного луча, при котором форма валиков является оптимальной, а коэффициент использования порошкового материала – максимальным.
3. Использование «короткого» сопла позволяет получать валики с более правильными соотношениями высоты к ширине, в связи с этим использование их является предпочтительным из двух исследованных.

Для изучения влияния каждого параметра процесса на формообразование валика были проведены эксперименты по нанесению порошка Metco 42С на основе углеродосодержащей стали, чтобы определить оптимальные параметры для проведения наплавки.

После проведения предварительных экспериментов и анализа полученных образцов, установленная оптимальная геометрия единичного валика, которая удовлетворяет следующим двум условиям:

1. Соотношение между высотой и шириной валика - $H=1/2L-1/5L$;
2. Допустимый коэффициент перемешивания $D=0.1-0.4$ (валик с наименьшим D более предпочтителен);

Для изучения влияния технологических параметров, важных для получения качественной геометрии валика, был выбран следующий подход: один из параметров варьируется, в то время как другие параметры остаются неизменными. В экспериментах были изменялись три основных параметра: мощность P (Вт), скорость V (мм/мин) и расход порошка F (г/мин). Схема

Основные параметры для проведения экспериментов

	P(Вт)	V(мм/мин)	F (г/мин)
Эксперимент №1	Постоянная 800	Переменная 100-900	Постоянная 15
Эксперимент №2	Переменная 200-1200	Постоянная 500	Постоянная 15
Эксперимент №3	Постоянная 800	Постоянная 500	Переменная 3-27
Эксперимент №4	Переменная 160-1760	Переменная 100-1100	Постоянная 15

В результате анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Расход порошкового материала позволяет регулировать не только геометрию валика, но и влияет на процесс отражения лазерного излучения, а в совокупности со скоростью перемещения и на физику формирования геометрии через силы поверхностного натяжения.
2. Мощность лазерного излучения в совокупности со скоростью процесса качественно влияет не только на производительность процесса, но позволяет весьма эффективно регулировать перемешивание основного материала с присадочным.

Полученные зависимости позволили довольно точно определить «окно» параметров режима технологического процесса для порошкового материала Metco 42С и стальных подложек. На основании описанной методики становится возможным подбор параметров режима для другого химического состава порошкового материала и подложки. Предварительно выбрав оптимальное положение газопорошковой струи относительно лазерного пучка необходимо задать начальными параметрами режима, которые предоставляет производитель порошкового материала или выбраны самостоятельно в качестве исходной точки. После этого последовательно варьируя один из параметров и руководствуясь геометрией валика постепенно выбираются возможные значения этого параметра, а после этого их совокупность, что в итоге дает возможность получения «окна» параметров режима для имеющегося технологического оборудования.

Также, на основе проведенных экспериментов, при разработке технологической карты режимов для других материалов можно сделать следующие рекомендации:

1. Оптимальная скорость процесса наплавки составляет от 400 до 600 мм/мин. При увеличении скорости процесса снижается количество порошка и количество вводимой энергии в основной материал, что приводит к снижению и высоты, и ширины валика одновременно, но при этом увеличивается коэффициент перемешивания.
2. Оптимальная мощность лазерного излучения, вводимого в процессе наплавки, составляет от 600 до 800 Вт. При увеличении мощности лазерного излучения увеличивается эффективность процесса, но также и увеличивается объем подплавления основного материала, а также выравнивается геометрическое соотношение между высотой и шириной валика.

3. Оптимальные расходы порошка составляют от 13 до 17 г/мин. При увеличении расхода порошкового материала большая часть лазерного излучения рассеивается и идет на расплавление порошкового материала, а не подложки, кроме того происходит увеличение высоты валика при снижении его ширины, что позволяет легко выйти из диапазона приемлемого соотношения этих параметров с точки зрения геометрии валика.
4. При увеличении погонной энергии (отношения мощности лазерного излучения к скорости процесса), с фиксированным расходом порошка, высота валика снижается при увеличении глубины подплавления основного материала, но и ширина валика снижается, что позволяет оптимизировать производительность процесса и геометрические характеристики валика при различных режимах.
5. При корректировке удельного расхода порошкового материала можно регулировать формообразование валиков и получить серию валиков с подобными размерами, тем самым регулируя толщину наплавленного слоя.

В четвертой главе представлены результаты исследования металлографических свойств покрытий, полученных методом лазерной модификации. Полученная в 3-ей главе методика подбора параметров режима была отработана на одном порошковом материале на основе железа. Тем не менее в машиностроительных применениях встречаются абсолютно разные материалы, поэтому требуется удостовериться, что лазерное модифицирование поверхности позволяет получать качественные покрытия различного класса, а также проверить металлографические свойства этих покрытий. Для решения этой задачи проведен обзор используемых материалов в машиностроении и выбраны типовые порошковые материалы, практически полностью закрывающие потребности современного производства. К ним относятся: нержавеющие стали мартенситного (40X13) и аустенитного (0X17) классов, быстрорежущая сталь P6M5, никелевый сплав - аналог ПГ-СРЗ, кобальтовый сплав - аналог Stellite 6, медный сплав - оловянистая бронза. Используя разработанную методику и руководствуясь полученными принципами влияния основных параметров режима были нанесены эти покрытия с тщательным металлографическим анализом, а также проведено исследование пористости этих покрытий.

В результате проведения экспериментального исследования нанесения порошковых материалов на основе железа, никеля, меди и кобальта методом лазерного модифицирования с коаксиальной подачи газопорошковой струи была продемонстрирована работоспособность данного метода для получения покрытий с различными порошковыми материалами.

Кроме того, полученные данные свидетельствуют о том, что при нанесении покрытий необходима корректировка не только параметров режима процесса, а также экспериментальное исследование коэффициента перекрытия с последующей проверкой наличия пор металлографическим или рентгеновским методом.

В пятой главе рассмотрены результаты практических испытаний образцов, полученных лазерной модификацией слоев специальных материалов, наиболее

подходящих для нанесения уплотняющего покрытия на запорную арматуру паровой системы охлаждения атомного реактора корабля.

Была разработана технология создания функциональных покрытий на уплотнительных полях арматуры – нанесение многослойных покрытий на заготовки будущих деталей. Исследование этих опытных образцов проводились на заводе – потребителе продукции: ООО «Балтийский завод - судостроение».

В качестве опытного изделия по согласованию с инженерами предприятия была принята стальная задвижка для пара. Необходимо было н нанести функциональное покрытие на детали «Диск» (заводской номер 533-61.960, материал основы – Сталь 20) и «Седло» (533-61.928, материал основы – 12МХ).

Согласно прежней технологии в процесс подготовки детали под наплавку непосредственно функциональной поверхности входил целый ряд процедур (см. диссертацию Рис. 5.2):

- механическая обработка заготовки (строжка, фрезерование, расточка и т.д.);
- нанесение подслоя из аустенитной стали (для снижения растрескивания защитного покрытия);
- механическая обработка подслоя (строжка, фрезерование, расточка и т.п.).

По этой причине трудоемкость процесса создания новой детали была очень высокой. Разработанная технология предполагает нанесение функционального покрытия без промежуточных слоев, что значительно быстрее, и без промежуточных операций механической обработки.

Кроме того, существуют сложности, связанные с ручной наплавкой поверхностей по заводской технологии:

1. Плохое качество электродов, невозможно получить качественную наплавку, выход годных изделий составляет 50%;
2. При наплавке возникает необходимость выполнение канавок под подслоя и основную наплавку;
3. Ввиду больших тепловложений требуется термообработка изделий после наплавки;
4. Большой объем механической работы после наплавки;
5. Требуется сварщик высокой квалификации с опытом работы по проведению наплавки.

В результате проведенного анализа порошковых материалов был выбран порошковый материал Stellite 6 для проведения процесса нанесения покрытия. Данный материал широко распространен не только за рубежом, но имеет аналог в отечественном машиностроении – материал В-3К. Сплав Stellite 6 имеет прекрасное сопротивление термоудару и большинству типов механического износа, особенно в сочетании с коррозией и/или высокой температурой. Пара трения Stellite 6/Stellite 6 имеет очень низкий коэффициент трения порядка 0,12 и прекрасные антизадирные свойства. На данный момент этот материал наносится с применением дуговых и плазменных источников.

При помощи созданной методики выбора параметров процесса был получен стабильный режим нанесения покрытия из порошкового материала Stellite 6. Используя данные режимы было проведено нанесение покрытий на детали «Диск» (533-61.960, материал основы – Сталь 20) и «Седло» (533-61.928,

материал основы – 12МХ). См. диссертацию Рис. 5.8 и Рис. 5.9 – показаны детали, обработанные лазерным излучением и готовые к дальнейшей механической обработке для установки в опытно-штатную задвижку для проведения испытаний, согласно требованиям РМРС (Российский морской регистр судоходства) с последующей аттестацией данного технологического процесса для судостроения.

Микроструктура нанесенного покрытия имеет направленное ячеисто-дендритное строение. Пористость нанесенного материала низкая. Размеры пор составляют $\varnothing 0,01 \pm 0,1$. Проведенные испытания на питтинговую коррозию по ГОСТ 9.912 показали, что материал весьма устойчив к агрессивным средам, которыми является пар и морская вода. Проведение испытаний на межкристаллитную коррозию также подтвердило полное отсутствие микротрещин в структуре материала. Твердость нанесенного покрытия составляет 45-52 HRC в зависимости от типа материала, на которой проводится нанесение покрытия. Такой разброс значений объясняется разными теплофизическими свойствами основного материала, что сказывается на тепловых процессах при проведении лазерной модификации поверхности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Применение математического моделирования позволило сконструировать геометрию коаксиальных сопел для подачи порошка при нанесении покрытий, которые позволяют решить две актуальные задачи – локализация обработки (сопла с углом схождения газопорошкового потока 52 градуса) и высокая производительность (сопла с углом схождения газопорошкового потока 64 градуса). Установлено, что скорость порошковых частиц составляет от 1 до 6,5 м/с для различных расходов газа и практически не зависит от скорости частиц при входе в сопло, что значительно упрощает требования к устройству подачи порошковых материалов.

2. Разработана методика по определению параметров режима с получением единичных валиков, удовлетворяющих следующим характеристикам:

- Соотношение между высотой и шириной валика – $H = 1/2L - 1/5L$;
- Допустимый коэффициент перемешивания основного материала и присадочного $D = 0.1-0.4$ (валик с наименьшим D более предпочтителен);

Данные параметры позволяют получать валики и, в последующем, покрытия с высокой однородностью по всей толщине с минимальной вероятностью существования пористости из-за широкого перекрытия валиков, что требуется для увеличения производительности технологического процесса, а также гарантирует прочную металлическую связь по всей ширине слоя с минимально возможной глубиной перемешивания и изменения структуры основного материала, а также высокими эксплуатационными свойствами получаемого покрытия.

3. Разработанная методика по определению параметров режима апробирована при нанесении покрытий различного класса (40Х13, 0Х17, Stellite 6, Р6М5, CuSn11, ПГ-СРЗ) и показала, что в среднем, при лазерном модифицировании поверхности, пористость нанесенных покрытий составляет

около 2%. Крупные поры неправильной формы на поперечных и продольных шлифах свидетельствуют о нестабильном режиме расплавления попадающего в валик порошкового материала. В таких случаях необходимо увеличивать погонную мощность лазерного излучения, однако при этом возрастает глубина подплавления основного материала и перемешивание порошкового и основного материала подложки, что может сказаться на эксплуатационных свойствах нанесенного покрытия.

4. Металлографические исследования полученных покрытий показали, что наружная поверхность наплавленных слоев имеет направленную шероховатость в виде отдельных канавок, расположенных с шагом примерно 1,0 мм и глубиной от 100 до 200 мкм. Ширина отдельного прохода зависит от состава присадочного порошка и составляет от 950 до 1100 мкм и мало меняется по длине шлифа. Исследование микроструктуры полученных покрытий показало, что наплавленные образцы имеют три ярко выраженные зоны, сформировавшиеся в результате наложения последовательных проходов при лазерной наплавке: литую, металл, подвергшийся термическому влиянию (ЗТВ) и основной металл, не испытывавший теплового воздействия.

5. Металлографический анализ показал, что рост твердой фазы начинается от оплавленных элементов основы, что свидетельствует об установлении прочной металлической связи между основой и наплавленным металлом. В наплавленном металле имеются локальные очаги с повышенными значениями твердости, что связано с наличием упрочняющих фаз. Интерметаллидные фазы выделяются в виде сферических частиц со средним размером от 1 до 3 мкм. В переходной зоне по границе участка сплавления присутствует тонкий слой от 2 до 30 мкм с переходным химическим составом, зависящим от режима и марки основного и присадочного металла. Ширина зоны термического влияния изменяется от 80 до 300 мкм и зависит от режимов и состава наплавочного порошка.

6. Разработана технология лазерной модификации поверхностей уплотнительных полей для запорной арматуры паровой установки охлаждения атомного реактора корабля, обеспечивающая высокие эксплуатационные свойства наряду с высокой производительностью процесса. Проведение этой работы по внедрению лазерной модификации поверхностей в отечественное судостроение позволяет снизить трудоемкость процессов, их материалоемкость и повысить автоматизацию технологического процесса.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Григорьянц А.Г., Мисюрин А.И., Третьяков Р.С. Анализ влияния параметров коаксиальной лазерной наплавки на формирование валиков // Технология машиностроения. 2011. №11 (113). С. 19-21. (0,18 п.л./0,06 п.л.).
2. Сравнение эксплуатационных характеристик покрытий из нержавеющей сталей аустенитного и мартенситного классов, полученных методом лазерной газопорошковой наплавки / Р.С. Третьяков [и др.] // Наука и образование. 2012. №06. <http://technomag.edu.ru/doc/418550.html>. (0,75 п.л./0,19 п.л.).
3. Исследование влияния режима генерации лазерного излучения на структуру и свойства инструментальной стали при газопорошковой наплавке /

Р.С. Третьяков [и др.] // Наука и образование. 2012. №07. <http://technomag.edu.ru/doc/418604.html>. (0,63 п.л./0,16 п.л.).

4. Исследование пористости покрытий из кобальтовых и никелевых сплавов, наплавленных лазерным излучением / Р.С. Третьяков [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. С. 165-173. (0,56 п.л./0,11 п.л.).

5. Сравнение коррозионной стойкости покрытий из кобальтовых и никелевых сплавов, наплавленных лазерным излучением / Р.С. Третьяков [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. С. 174-180. (0,44 п.л./0,09 п.л.).

6. Исследование коррозионной стойкости покрытий разного состава, полученных методом лазерной наплавки / Р.С. Третьяков [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2012. №06. С. 36-38. (0,19 п.л./0,03 п.л.).

7. Третьяков Р.С., Ставертий А.Я., Шишов А.Ю. Методы и применения лазерной наплавки // РИТМ. 2012. №2 (70). С.34-36. (0,18 п.л./0,06 п.л.).

2045 424