

Гонсалес Луис Фернандо

**МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО
НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ВАЛЫ
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

05.02.07 – Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель:

Шиганов Игорь Николаевич
доктор технических наук, профессор

Официальные опоненты:

Овчинников Виктор Васильевич
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Московский
политехнический университет»

Петровский Виктор Николаевич
кандидат физико-математических наук, доцент
Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»

Ведущая организация:

ОАО «Национальный институт
авиационных технологий»
г. Москва

Защита диссертации состоится «__» _____ 2017 г. 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, стр. 1.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета

д.т.н., доцент



Михайлов В.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Развитие технологий нанесения покрытий происходит одновременно с развитием многих отраслей машиностроения. Предъявление высоких требований к деталям, работающих в агрессивных условиях, приводит технологов к все более трудным задачам восстановления деталей и создания функциональных покрытий. Одним из мало изученных направлений в технологиях наплавки является нанесение покрытий из кобальтовых сплавов типа Stellite лазерным методом.

Кобальт придает сплавам ряд чрезвычайно важных свойств, таких, как износостойкость, сопротивление ползучести, усталостную прочность при высоких температурах, устойчивость к сульфидированию и другие. Эти свойства безусловно являются привлекательными для их промышленного применения в особо ответственных конструкциях и деталях энергетического машиностроения и в частности газотермических установок (ГТУ). Создание покрытий из этих сплавов сопровождается возникновением трещин в процессе наплавки, высоким содержанием основного материала детали в покрытии, неоднозначностью поведения покрытий при различных температурах из-за изменения атомной структуры кобальта, поэтому необходимы методы, обеспечивающие благоприятные условия для создания покрытий.

Из всех возможных методов нанесения покрытий в наибольшей степени указанным требованиям отвечает газопорошковый лазерный процесс. Этот метод позволит наносить покрытия из кобальтового сплава не только с сохранением свойств исходного наносимого материала, но и улучшить его свойства за счет больших скоростей охлаждения, а также обеспечить гибкость процесса.

Однако, до настоящего времени не проводилось систематических исследований технологии и оптимизации режимов процесса газопорошкового лазерного нанесения сплавов типа Stellite на валы энергетического оборудования. В связи с этим тема данной работы является актуальной.

Цель и задачи исследования

Цель работы - создание комплекса методик, обеспечивающих оптимизацию выбора материалов, оборудования, режимов обработки и испытаний для получения высококачественных износостойких покрытий при ремонте валов ГТУ.

Задачами исследования являются следующие:

1. Выбор вида и состава материала для нанесения на поверхность материала вала ГТУ лазерным методом.
2. Обоснование и выбор оборудования, необходимого для нанесения покрытий на поверхность валов ГТУ лазерным методом.

3. Разработка методики и выбор геометрии сопла для подачи порошка в зону нанесения покрытий соосно с лазерным лучом.
4. Разработка расчётно-селективной методики оптимизации параметров лазерного нанесения покрытий.
5. Определение по расчётно-селективной методике режимов нанесения покрытий лазерным методом порошка Stellite 6 на материал вала AISI 4340.
6. Получение по методикам регрессионного анализа расчётных зависимостей геометрических параметров валика от режимов обработки при нанесении покрытий лазерным методом порошка Stellite 6 на материал вала AISI 4340.
7. Выбор оптимальных режимов для получения покрытий, отвечающих требованиям восстановительного ремонта валов ГТУ.
8. Испытания механических свойств, износа и микроструктуры полученных покрытий на оптимальных режимах. Выбор лучшего режима.
9. Разработка технологической инструкции восстановительного ремонта валов ГТУ лазерным нанесением покрытий.

Научная новизна

1. Разработан комплекс методик, позволяющий оптимизировать технологические режимы нанесения порошковых износостойких покрытий из сплава Stellite 6 на валы энергоустановок лазерным методом. Полученные покрытия на оптимальных режимах нанесения имеют наивысшие механические свойства.
2. Расчётом по регрессивным методикам определены основные критерии значимости параметров нанесённых слоёв во взаимосвязи с режимами обработки и механическими свойствами покрытий. Установлено, что максимальный критерий значимости может достигать значений от 0,25 до 0,3.
3. Показано, что расчётные и экспериментальные значения параметров нанесённого слоя с коэффициентами, находящимися в установленном диапазоне, обеспечивают максимальную твёрдость и износостойкость после лазерной обработки, превышающие соответствующие значения материала валов от 1,7 до 3,7 раз.
4. Установлена взаимосвязь структурного и фазового состава покрытия с режимами обработки, параметрами покрытия и получаемыми механическими свойствами. Доказано, что наилучшая износостойкость достигается при содержании в покрытии фазы карбида Cr_7C_3 в количестве от 15,0 до 16,5% и создании мелкодисперсной структуры с расстоянием между осями дендритов второго порядка менее 1,8 мкм и шириной дендритов менее 1,41 мкм.

Практическая значимость работы

1. Разработанные методики позволяют оперативно, с наименьшей затратой времени и материалов определять наилучшие режимы нанесения покрытий лазерно-порошковым методом.
2. Разработан техпроцесс и технологическая инструкция восстановления валов ГТУ из стали AISI 4340 с использованием материала Stellite 6 лазерно - порошковым методом.

Методы исследования

Поставленные задачи решались с использованием теоретических и экспериментальных методов исследований. Для математического моделирования газовых потоков в сопле, использовали стандартный программный продукт MATLAB 7.11. Металлографические исследования проводили с применением установок для полировки и шлифовки образцов Struers Tegramin-30, микроскоп Olympus GX51. Фазовый состав определяли с применением рентгеновского микроскопа. Скорость движения частиц в процессе лазерной инжекции измеряли высокоскоростной камерой Fastvideo-500M. Трибологические свойства определяли на установке Tribometer фирмы CSM (Швейцария) и профилометра HOMMEL-ETAMIC T8000.

Достоверность

Достоверность работы обеспечена корректным использованием общих положений фундаментальных наук (уравнения баланса энергии, теории движения частиц в потоке, массопереноса и т.д.), проверена по известным критериям изучаемых процессов и подтверждена экспериментальными данными.

Апробация работы. Результаты работы доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» ФГБОУ ВПО МГТУ имени Н.Э. Баумана (Москва, 2015, 2016 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна: Машиностроительные технологии» (Москва, апрель 2014 г.), Международной научно – технической конференции «Фотоника 2016» (Москва, 2016 г.).

Публикации. Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены в 3-х научных статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, общим объемом 3,2 п. л. и тезисах конференции объемом 0,1 п. л.

Объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе и списка литературы из 76 наименований. Диссертация изложена на 146 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков и 52 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, указаны цель работы, научная новизна, практическая ценность работы, сведения об апробации работы и публикациях.

В главе 1 проведен литературный обзор, посвященный сведениям об энергетических газотурбинных установках (ГТУ) и их элементах, которые необходимо восстанавливать или упрочнять для обеспечения их надёжной работы.

Показано, что одним из наиболее нагруженных элементов турбины является ротор, основными деталями которого являются валы, диски и рабочие лопатки. В данной работе особое внимание было уделено упрочнению валов, так как это весьма ответственные детали, требующие особо тщательного подхода к выбору материалов, механической и термической обработки, а также технологии ремонта.

Основными задачами при создании восстановительных и ремонтных технологий является выбор наносимого материала, а так же технологии нанесения покрытия. Рассмотрены различные материалы, применяемые для создания покрытий. Выбор материала является особо сложной задачей, для решения которой требуется учет большого количества факторов. Подобные задачи не могут быть решены без использования методов многофакторной оптимизации. Необходимо найти варианты, наиболее удовлетворяющие многим противоречивым требованиям, поскольку улучшение одних параметров часто приводит к ухудшению других. Задача проектирования покрытия сводится к нахождению оптимального в данном случае, наиболее предпочтительного варианта.

Другой важной задачей является выбор метода нанесения покрытий. Рассмотрены основные, применяемые в настоящее время методы. Так как валы не должны деформироваться в процессе тепловой обработки, необходимо применять методы, обеспечивающие минимальное тепловлажнение. Кроме того, как правило, эти валы делают из высококачественных сталей, поэтому в процессе наплавки должно быть минимальное перемешивание наплавленного металла с материалом основы, так как это может привести к образованию дефектов структуры материала вала, что снижает его механические характеристики. Из всех рассмотренных процессов этим требованиям в большей степени отвечают лазерные технологии нанесения покрытий. Однако этот метод имеет ряд особенностей его применения, как с точки зрения оборудования, так и с точки зрения режимов обработки. Для получения требуемого качества необходимо увязывать большое количество условий и параметров. В рассмотренной литературе не обнаружено комплексных методик оптимизации параметров режимов, особенностей оборудования и материалов для восстановления деталей валов ГТУ. В связи с этим в данной работе была поставлена актуальная задача разработки и создания комплексной

методики оптимизации процесса нанесения износостойких покрытий на валы ГТУ лазерным методом.

На основании проведённого литературного обзора были сформулированы задачи исследования.

Во второй главе приведено описание методик исследования, использованного оборудования и материалов. Из многообразия материалов, применяемых для нанесения покрытий, были выбраны сплавы Stellite на основе кобальта. Это наиболее известные и широко применяемые сплавы с самыми «универсальными» свойствами. Износостойкие кобальтовые сплавы относятся к системе Co-Cr-W, причем содержание Cr в сплавах этой группы является наибольшим по сравнению с другими, так как он имеет ключевое значение в образовании карбидов с различным соотношением Cr/C. Сплавы Stellite имеют превосходную сопротивляемость кавитации, коррозии, эрозии, абразивному износу и истиранию. Конкретно в работе использован порошок дисперсностью 70-90 мкм из сплава Stellite 6 (российский аналог ПР-К60Х30ВС или ВЗК), который сочетает в себе все вышеперечисленные свойства.

В качестве подложки использована конструкционная низколегированная сталь со средним содержанием углерода AISI 4340 (аналог этой стали в России сталь 40ХН2МА), которая наиболее часто применяется для изготовления валов ГТУ.

Экспериментальные технологические работы проводились на роботизированной лазерной установке. В состав установки входил волоконный лазер ЛС-4-К, промышленный робот ABB IRB 2400, оптическая головка Precitec YW50 и питатель для подачи порошка. Скорость движения частиц в процессе лазерной инжекции измеряли высокоскоростной камерой Fastvideo-500M.

Металлографические исследования проводили по стандартным методикам с применением микроскопа Olympus GX51, рентгеновского микроскопа. Обработку микроструктур проводили автоматически с применением программы ImageScope.

Для измерения микротвёрдости применяли твердомер Ecos Workflow. Испытания на коэффициент трения и износ поверхности осуществляли по стандартной методике с использованием установки Tribometer фирмы CSM (Швейцария) и профилометра HOMMEL-ETAMIC T8000.

Для математического моделирования и обработки использовали стандартный программный продукт MATLAB 7.11, программу Microsoft Office Excel 2007, методы линейной и полиномической регрессии.

Третья глава посвящена методикам оптимизации формы и геометрии сопла для подачи порошка при лазерном нанесении покрытий. Показано, что наиболее универсальный метод подачи порошковых материалов в зону

лазерного воздействия – это 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, то есть нечувствительной к направлению движения при нанесении покрытия.

Для обеспечения эффективности процесса нанесения, а именно доставки частиц в соответствующее место поверхности и увеличение коэффициента использования порошкового материала параметры газового потока и порошка были оптимизированы. Оптимизация осуществлялась с применением физико–математических моделей, построением численных алгоритмов решения нестационарных задач механики сплошных сред и их экспериментальной проверкой. Для решения подобных задач проводится моделирование течения потока газа через сопло в открытую среду. Поскольку процессы подачи порошка и подачи газа являются стабильными, в расчете принимают, что поток является ламинарным, установившимся, сжимаемым, однородный по составу и распространяется внутри сопла.

Моделирование многофазных потоков производилось в несколько этапов. На первом этапе рассчитывали движения газовой среды, на втором этапе производится расчет движения частиц в газовой среде, а третий этап является проверочным для выполнения законов сохранения и неразрывности среды. Струйное течение газа определяли численным решением уравнений Навье–Стокса методом конечных элементов по неявной схеме с помощью программы Fluent (ANSYS Inc.). Полученная картина движения потока показана на Рис. 1.

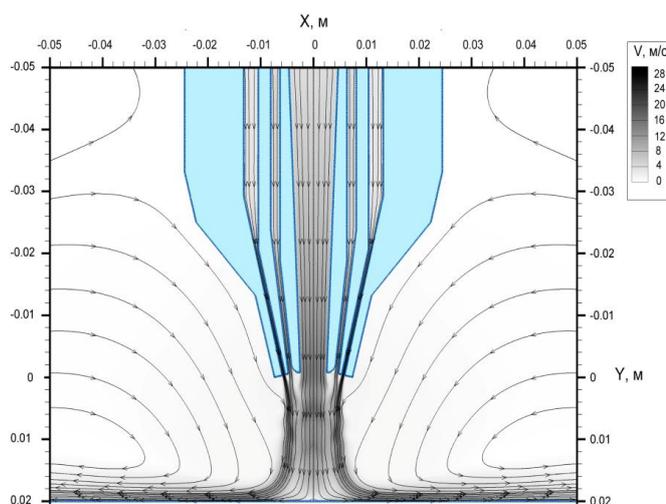


Рис. 1. Расчётное поле скорости и линии тока газа

Для расчета движения частиц применена модель на основе потока газопорошковой взвеси. Для осесимметричного, устойчивого, турбулентного сплошного потока газопорошковой струи с однородным химическим составом и при отсутствии внешних сил, использовано следующее выражение:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u_r) = 0 \quad (1)$$

где x и r – соответственно осевые и радиальные координаты; u_x – осевая скорость; u_r – радиальная скорость; ρ – плотность сплошного газа.

Расчет сопла проводится численным методом с использованием вычислительной машины, оптимизированной для обработки групп элементов разбиения. Транспортирующим газом является аргон. Граничные условия для сжимаемого потока были следующие: входной расход газа, выходное давление в дальней зоне. Значение входного расхода являлось варьируемым параметром, выходное давление является следствием неразрывности газопорошкового потока. Траектория движения частиц рассчитывалась интегрированием баланса сил, действующих на частицу, который состоит из силы сопротивления, силы тяжести и градиента давления и определяется по формуле:

$$\frac{du_i^p}{dt} = F_D(u_i - u_i^p) + \frac{g_i(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i/\rho_p \quad (2)$$

Используя данную модель можно изменять параметры перетяжки, расстояние от поверхности, моделировать площадь нанесённого порошкового материала. Все эти параметры регулируются в зависимости от материала порошка, его размеров, расхода. На основании расчётных моделей были оптимизированы размеры выходного сопла для нанесения покрытий. Расчет проводится по методу конечных элементов, когда протяженное трехмерное тело разбивается на элементы в форме тетраэдера. На Рис. 2 расчётная модель порошкового потока показана.

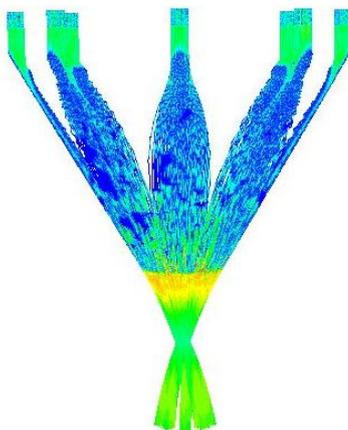


Рис. 2. Расчётная модель порошкового потока

Путем численного расчета и математического моделирования процесса истечения газопорошкового потока из сопла спроектировано сопло, показанное на Рис. 3, с двумя конусами внешним и внутренним.

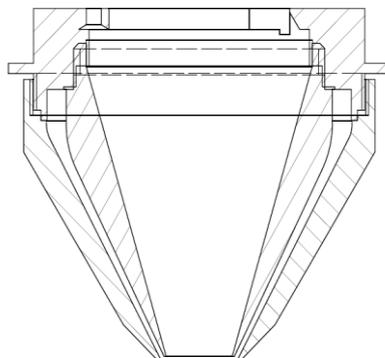


Рис. 3. Конструкция сопла для нанесения порошковых покрытий

Оптимальный угол раскрытия конуса составляет 65 градусов, это обеспечивает диаметр перетяжки потока от 1 до 5 мм на расстоянии от среза не менее 10 мм, что даёт возможность получать максимальную ширину наплавляемого материала, и высокую производительность процесса. Используя метод регрессионного анализа проведено математическое моделирование работоспособности конструкции созданного сопла в процессе нанесения покрытий в условиях реально действующих факторов и определено влияние параметров на газопорошковый поток. В частности расчётным путём определяли :диаметр перетяжки газопорошкового потока, зазор между срезом сопла и центром перетяжки газопорошкового потока и скорость частиц в зоне лазерного воздействия при различных параметрах струи и частиц.

Глава 4 посвящена разработке методик оптимизации режимов нанесения износостойких покрытий лазерным методом и определению этих режимов для покрытий из сплава Stellite 6 на сталь AISI 4340. В качестве основных параметров, определяющие качество наплавленного слоя, были приняты мощность лазерного излучения (P), скорость обработки (V), расход порошка (F) и диаметр пятна сфокусированного луча (D). Параметры, которые были определены для оптимизации размеров валика следующие: ширина валика (L), высота валика (H), глубина проплавления подложки (h), величина зоны термического влияния (ЗТВ), угол смачивания валика (α), площадь сечения покрытия (A_c) и площадь сечения проплавленной части подложки (A_m). Кроме этого, учитывались расчётные параметры, такие как коэффициент перемешивания " γ " и коэффициент формы валика, равный отношению высоты к его ширине H/L . Для экспериментальной части была использована факторная модель 2^4 с одним повторением и трех центральных точек, что составило 38 наплавленных валиков на 19 различных режимах. Все покрытия не имели дефектов в виде трещин, пор и отслоений.

Для обработки полученных значений обмеров всех валиков был разработан селективный метод. Целью селективной обработки было определение размерных критериев, к которым необходимо стремиться при оптимизации режимов наплавки. Величина этих критериев указана в Таблице 1.

Таблица 1.

Величина размерных критериев валиков

L (мм)	H (мм)	h (мм)	ЗТВ (мм)	α (град)	A_c (мм ²)	A_m (мм ²)	Г	H/L
4,51	0,51	0,03	0,34	24,80	6,7	0,03	0,104	0,205

Путём селективного отбора с помощью специальной программы Microsoft Office Excel 2007 из всех 38 валиков были выбраны значения, близкие к указанным размерным критериям. Для селективной оценки предложено 7 критериальных вариантов приближения геометрических параметров полученных экспериментально валиков к критериям их величины. Обработка этих вариантов осуществлялась селективным методом. В частности, была создана функция, которая состоит из суммы частичных отклонений каждого геометрического параметра от значения, выбранного как оптимальное. Функция определяет относительную погрешность каждого валика от конкретного значения размера, выбранного за критерий, а также общую сумму «ошибок». Чем меньше ошибка, тем выше позиция в списке лучших режимов наплавки.

Однако, не все параметры имеют одинаковую значимость при оценке качества наплавки. В различных случаях наиболее важным может быть или ширина или перемешивание или какой-то другой параметр. Для оценки значимости параметров был введён коэффициент К. Оценка общей погрешности с коэффициентом К выглядит следующим образом:

$$E_j = K_L E_L + K_H E_H + K_\alpha E_\alpha + K_h E_h + K_{ЗТВ} E_{ЗТВ} + K_{A_c} E_{A_c} + K_{A_m} E_{A_m} + K_\gamma E_\gamma + K_{H/L} E_{H/L} \quad (3)$$

На основе относительной погрешности каждого валика получается линейная функция с коэффициентами, которые устанавливаются в зависимости от важности каждого параметра по своему критерию К в диапазоне от 0 до 1. Чем меньше ошибка, тем лучше позиция в списке. Было рассмотрено 4 варианта значений значимости критериев и к каждому варианту сделан выбор значений из 8 валиков. Установлено, что максимальный критерий значимости может достигать значений от 0,25 до 0,3. В результате проведённого экспериментально-селективного анализа были выбраны четыре режима обработки, показанные в таблице 2, позволившие получать валики с размерами наиболее близкими к выбранным критериям.

Таблица 2.

Выбранные оптимальные режимы обработки

№	Мощность,	Скорость,	Расход порошка,	Диаметр пучка,
1	1500	6,0	7,0	2,0
2	2500	6,0	7,0	1,0
3	2000	9,0	5,0	1,5
4	2500	6,0	3,0	2,0

На этих режимах были изготовлены образцы, которые в дальнейшем исследовали на механические свойства. Для подтверждения и уточнения полученных режимов по экспериментально-селективной методике, а так же описания зависимостей влияния отдельных параметров наплавки на геометрические размеры валиков была проведена статистическо-математической обработка экспериментальных результатов и сделан регрессионный анализ. Степень влияния входных параметров на выходные оценивалась нормализацией, то есть заменой размерных переменных x_i на безразмерные значения Δx_i по следующей формуле:

$$\Delta x_i = (x_i - x_{i0}) / (3/2 \cdot t_i), \quad (4)$$

где Δx_i – безразмерное значение переменной; x_i – исходное значение физической переменной; $x_{i0} = (x_{i \min} + x_{i \max})/2$ – среднее значение физической переменной; t_i – шаг ее варьирования; $x_{i \min}$ и $x_{i \max}$ – минимальное и максимальное значения физической переменной.

Для расчёта были использованы статистическая программа MINITAB 7 и функция SOLVER Excel 2007. Расчёты проводились по четырём вариантам: 1- множественная линейная регрессия; 2- множественная нелинейная регрессия; 3- простая линейная регрессия; 4- простая нелинейная полиномическая регрессия. По каждому из этих вариантов была получена система уравнений для всех геометрических параметров валика в зависимости от режимов обработки.

Для более точного выбора режимов обработки были проведены расчёты простых линейной и полиномической регрессий, построенные по каждому геометрическому параметру. По полученным уравнениям были построены зависимости геометрических параметров от всех параметров режимов обработки. Полученные зависимости позволяют определять оптимальные области режимов обработки. За оптимальные принимаются точки, в которых наблюдается наименьший разброс отклонений. Обработка зависимостей дала возможность выбрать оптимальный режим. Данный режим совпадает с одним из режимов, полученных статистическим методом. Для получения окончательного результата по выбору режима, необходимо провести

испытание механических свойств, полученных валиков на выбранных режимах, исследовать их микроструктуру и фазовый состав, что было сделано в следующей главе.

Глава 5 посвящена исследованию механических свойств полученных покрытий, изучению микроструктуры и фазового состава, а также технологии нанесения покрытий на валы ГТУ. Кроме геометрических параметров необходимо знать свойства, достигаемые на оптимальных режимах обработки. Одним из показателей качества покрытий является их твёрдость. Были замерены значения твёрдости для четырёх выбранных режимов в вертикальном и поперечном направлениях по сечению нанесённого слоя. Показано, что микротвёрдость снижается по высоте нанесённого материала и от середины слоя к краям. Средние значения твёрдости для различных режимов показаны в Таблице 3.

Таблица 3.

Сравнительные характеристики микротвёрдости и износа валика для разных режимов

Режимы	Износ, $\text{м}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$	Максимальная микротвёрдость, (HV 0.1)
1	$1,15 \cdot 10^{-14}$	522
2	$2,06 \cdot 10^{-14}$	511
3	$1,93 \cdot 10^{-14}$	464
4	$2,52 \cdot 10^{-14}$	511
Материал подложки	$4,29 \cdot 10^{-14}$	243

Для оценки основной характеристики покрытия – величины износа были проведены трибологические испытания методом измерительного скольжения на автоматизированной машине трения (трибометре) TRIBOMETER фирмы CSM Instruments с возвратно-поступательным движением по схеме стержень–пластина. Для испытаний поверхность наплавленных валиков шлифовали. Средние значения износа показаны в Таблице 3. Как видно из Таблицы 3, на всех четырёх режимах износ в 2,1-3,7 раз меньше, чем у материала подложки, а твёрдость в 2,0-2,14 раза превышает значения материала подложки. Эти показатели говорят о том, что эффективность применения лазерного метода нанесения покрытий из Stellite 6 на поверхность стали AISI 4340 достаточно высока. Однако, видно, что между режимами наблюдается значительная разница. Например, износ, полученный на режиме 1 в 2,2 раза меньше, чем на режиме 4. Микротвёрдость на режиме 1 так же выше, чем на других режимах. Для определения причин разброса свойств в зависимости от режимов обработки были проведены исследования структуры наплавленных слоев его химического и фазового составов. Микроструктура образцов, полученных

методом лазерной наплавки, исследовалась с помощью металлографического анализа. При анализе микроструктуры наплавленного кобальтового сплава установлено, что при всех режимах лазерной наплавки наблюдается дендритное строение, причем размеры и направление роста дендритов изменяются как от режима к режиму (Рис. 4, а и б).

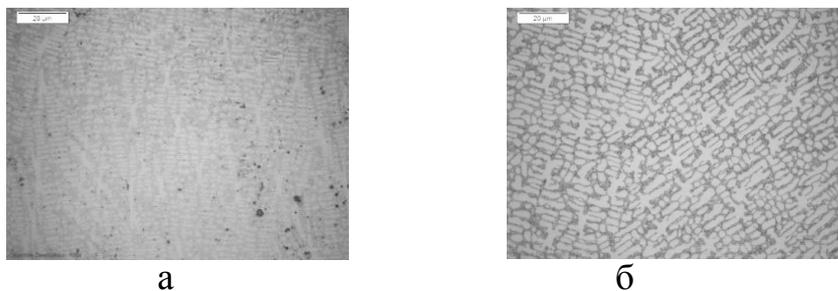


Рис. 4. Микроструктура наплавленных валиков по режиму: а-1; б-4.

Для количественной оценки дисперсности структуры валика определяли дендритный параметр, то есть расстояние между дендритными ветвями второго порядка, диаметр дендритных ветвей второго порядка, длину дендритов и их ширину. Эти значения были вычислены для разных режимов и по глубине наплавленного слоя. Установлено, что при всех режимах наплавки рост дендритного параметра наблюдается с увеличением глубины и составляет от 25 до 50 %. При использовании режима 1 формируется наиболее дисперсная структура с минимальным дендритным параметром равным 1,41.

Фазовый состав различных зон наплавленного сплава определяли методом рентгendifракционного анализа. Съёмка проводилась в $\text{Co K}\alpha$ -излучении в режиме непрерывного сканирования со скоростью $0.01^\circ/\text{с}$ в интервале углов $2\theta=30-125^\circ$. Период кристаллической решетки кобальтового твердого раствора определялся по дифракционному максимуму (311) с погрешностью $\pm 0.0004 \text{ \AA}$. Для определения доли карбидной фазы были определены отношения суммарной интенсивности всех линий карбида к суммарной интенсивности всех линий кобальтового твердого раствора. В покрытиях было установлено количество фаз Cr_7C_3 от 15 до 16,5%.

Сопоставление результатов испытания износостойкости и твёрдости с металлографическими исследованиями показали, что существенное значение в увеличении износостойкости имеет формирование мелкодисперсной структуры и текстуры наплавленного металла. Так режим 1, который создаёт самую мелкую структуру с наименьшим дендритным параметром 1,41, имеет наибольшие значения твёрдости и износостойкости. Твёрдость и износостойкость покрытию придаёт наличие карбидной фазы Cr_7C_3 . С увеличением количества карбидных частиц Cr_7C_3 в покрытии повышаются износостойкость и твёрдость. В зависимости от режима наплавки содержание

этой фазы в наплавленном материале изменяется. Показано, что из четырёх исследованных режимов наилучшие результаты даёт режим 1, сочетающий наилучшие характеристики по геометрическим параметрам, с высокими механическими и трибологическими свойствами за счёт благоприятной микроструктуры и фазового состава наплавленного металла.

Выбранные режимы были использованы для разработки технологии и инструкций нанесения покрытий из сплава Stellite 6 лазерным порошковым методом на валы ГТУ, изготовленных из стали AISI 4340.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработан комплекс методик, позволяющий оптимизировать технологические режимы нанесения порошковых износостойких покрытий из материала Stellite 6 на валы энергоустановок лазерным методом.
2. Путём оптимизации выбран метод коаксиальной подачи порошка для процесса нанесения покрытий из материала Stellite 6 на поверхность валов энергетического оборудования.
3. Используя методику расчёта потоков газа и порошка через коаксиальное сопло, определены оптимальные размеры сопла, диаметр струи порошка, расстояние между срезом сопла и обрабатываемой поверхностью, что позволило оптимизировать технологические параметры процесса обработки.
4. Расчётным путём определён оптимальный угол раскрытия сопла, который составил 65 градусов. Такое сопло позволяет регулировать диаметр пятна в зоне наплавки в широких пределах и получать максимальную ширину наплавленного материала и, соответственно, высокую производительность процесса.
5. Путём математического моделирования с применением регрессионного анализа оптимизированы параметры газопорошковой струи. Показано, что для частиц размером 20 – 60 мкм оптимальный диапазон значений диаметра перетяжки газопорошкового потока составляет от 2 до 4 мм, а оптимальный диапазон допустимых значений зазора между срезом сопла и обрабатываемой поверхностью составляет от 13 до 20 мм.
6. Разработана селективная методика оптимизации режимов обработки, по которой выбрано 4 режима, обеспечивающих наилучшие геометрические параметры валика.
7. Определены критериальные значения параметров геометрических параметров валиков, которые обеспечивают лучшие свойства. Установлено, что максимальный критерий значимости может достигать значений от 0,25 до 0,3. Показано, что расчётные и экспериментальные значения

коэффициента нанесённого слоя, находящегося в этом диапазоне, обеспечивают наилучшие геометрические характеристики валика и проплавления.

8. Расчётом по методикам простой линейной и полиномической регрессии построены зависимости от режимов обработки всех геометрических параметров валиков. Это позволило определить по данной методике оптимальный режим обработки, который совпал с одним из режимов, полученных селективным методом.
9. Экспериментально исследованы значения износостойкости и твёрдости полученных покрытий. Установлено, что на всех оптимальных режимах износ в 2,1-3,7 раз меньше, чем у материала подложки, а твёрдость в 2,0-2,14 раза превышает значения материала подложки. Это указывает на высокую эффективность применения лазерного метода нанесения покрытий из Stellite 6 на поверхность стали AISI 4340.
10. Установлена взаимосвязь структурного и фазового состава покрытия с режимами обработки, параметрами покрытия и получаемыми механическими свойствами. Доказано, что наилучшая износостойкость достигается при содержании в покрытии фазы карбида Cr_7C_3 в количестве от 15,0 до 16,5% и создании мелкодисперсной структуры с расстоянием между осями дендритов второго порядка менее 1,8 мкм и шириной дендритов менее 1,41 мкм.
11. Разработана технология и составлены технологические инструкции по лазерно-порошковому методу нанесения покрытий Stellite 6 на поверхность валов энергетического оборудования, изготовленных из стали AISI 4340.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Шиганов И.Н., Гонсалес Л.Ф., Третьяков Р.С. Восстановление деталей энергетических установок лазерной наплавкой// Технология машиностроения. 2015. № 10, С. 27-31. (1,0 п. л. / 0,3 п. л.)
2. Гонсалес Л.Ф., Шиганов И.Н. Оптимизация процесса нанесения стеллита на сталь лазерным методом// Сварочное производство. 2017. №3. С. 35-41. (1,2 п. л. / 0,7 п. л.)
3. Гонсалес Л.Ф., Шиганов И.Н., Базалеева К.О. Исследование структуры и свойств износостойких покрытий из стеллита, нанесённых на сталь лазерным излучением// Сварочное производство. 2017. №10. С. 18-23. (0,9 п. л. / 0,4 п. л.)
4. Гонсалес Л.Ф., Шиганов И.Н. Создание износостойких покрытий на валах газовых турбин// Тезисы конференции «Фотоника 2016». Москва, 2016. С. 10. (0,1 п. л. / 0,07 п. л.)