

На правах рукописи



Ибрагимов Егор Артурович

**РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕДНОГО ПОРОШКА МЕТОДОМ
СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ**

Специальность: 05.02.07 Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Томск – 2018

Работа выполнена в Юргинском технологическом институте (филиале)
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (ЮТИ ТПУ)

Научный руководитель:

кандидат технических наук **Сапрыкин Александр Александрович**

Официальные оппоненты:

Шишковский Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, доцент, Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории технических лазеров

Зверев Егор Александрович – кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», доцент кафедры «Проектирование технологических машин»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Защита состоится «15» июня 2018 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 003.038.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) по адресу: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФПМ СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4., а также на официальном сайте института <http://www.ispms.ru>.

Автореферат разослан « » _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор



В.И. Данилов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современных рыночных условиях для обеспечения конкурентоспособности предприятия необходимо значительное сокращение времени изготовления новой продукции. Соответствовать данным условиям современного рынка позволяют аддитивные технологии за счет возможности создания изделия любой геометрической сложности с заданной точностью без затрат на изготовление технологической оснастки.

Среди большого разнообразия видов технологий аддитивного производства особое место занимает технология селективного лазерного плавления – СЛП (Selective Laser Melting – SLM), при которой формирование объемного изделия происходит путем последовательного послойного наплавления металлического порошка под воздействием лазерного излучения. Интеграция СЛП в традиционный технологический процесс изготовления литейной оснастки, пресс-форм и формообразующих вставок из меди для мелкосерийного, штучного и опытного производства позволяет значительно сократить временные и трудовые затраты, а также получать изделия заданной формы, исключив использование специальной инструментальной оснастки с минимальной механической постобработкой либо вообще без нее.

Степень разработанности темы исследования. В России и за рубежом исследованием технологии получения изделий методом СЛП занимались ученые: И.В. Шишковский, И.Ю. Смуров, Е.В. Харанжевский, И.А. Ядроитцев, А.А. Сапрыкин, J.P. Kruth, D. Gu, N.K. Roy и другие. Анализ литературных источников показал, что изделия, полученные в процессе СЛП, в большинстве случаев обладают анизотропными механическими свойствами относительно сплавленных слоев, что не всегда является приемлемым. Большинство исследований направлены на изучение влияния основных технологических параметров СЛП (мощность лазерного излучения, скорость сканирования, толщина насыпаемого слоя порошка) на пористость полученных изделий и их предел прочности. При этом зарубежные компании-производители оборудования СЛП зачастую не раскрывают технологические режимы процесса СЛП, в том числе и характеристики используемых дорогостоящих «фирменных» порошковых материалов. Поэтому разработка оборудования и технологических решений получения функциональных изделий методом СЛП с использованием порошковых материалов отечественного производства, установление рациональных технологических режимов для формирования изделий с прогнозируемыми механическими свойствами и пористостью представляет собой актуальную задачу.

Целью диссертационной работы является разработка и изготовление оборудования СЛП, разработка методики изготовления функциональных изделий с прогнозируемыми механическими свойствами из медного несферического порошка путем установления рациональных технологических режимов СЛП.

Задачи исследования

1. Разработать конструкцию и изготовить экспериментальную установку СЛП, позволяющую проводить широкий спектр исследований синтеза изделий из металлических порошковых материалов в условиях защитной газовой атмосферы или глубокого вакуума.

2. Изучить влияние предварительной обработки медного порошка в мельнице-активаторе планетарного типа на размеры и форму частиц, насыпную плотность, теплофизические характеристики объема порошка и на предел прочности и пористость образцов, полученных СЛП.

3. Исследовать процесс плавления медного несферического порошка марки ПМС-1 под воздействием лазерного излучения при различных значениях основных параметров процесса СЛП: мощности лазерного излучения, скорости перемещения пятна лазера и толщины порошкового слоя.

4. Разработать методику предварительной оценки диапазона технологических режимов СЛП на основе математического моделирования процесса плавления медного порошка под воздействием движущегося лазерного луча с учетом теплофизических характеристик объема порошка.

5. Получить панель экспериментальных образцов методом СЛП из медного порошка в состоянии поставки и после обработки в планетарной мельнице.

6. Получить регрессионные зависимости предела прочности и пористости изделия от основных технологических режимов СЛП.

7. Определить рациональные технологические режимы СЛП (мощность лазерного излучения, скорость сканирования, толщина порошкового слоя, схема сканирования, температура порошка, диаметр пятна лазера) медного порошка для формирования изделий с прогнозируемыми механическими свойствами.

Научная новизна работы

1. Предложена методика определения диапазона основных технологических параметров СЛП: мощности лазерного излучения, скорости сканирования и толщины порошкового слоя, на основе математических модельных расчетов процесса СЛП с учетом теплофизических параметров порошкового материала.

2. Численным моделированием установлен диапазон значений основных технологических параметров СЛП, при котором в процессе плавления объема порошка под воздействием лазерного излучения формируется область температур, превышающая температуру плавления порошкового материала, определяющая геометрию зоны плавления, ширину и толщину сплавленного трека.

3. Статистической обработкой экспериментальных данных получены эмпирические зависимости предела прочности и величины пористости сплавленных образцов от основных технологических параметров СЛП, позволившие определить факторы (толщина слоя порошка, мощность лазерного излучения), оказывающие наибольшее влияние на увеличение предела прочности и уменьшение пористости в образцах, а также технологические условия СЛП, при которых получаемые изделия обладают максимальным изотропным пределом прочности и минимальной пористостью.

Практическая значимость работы

1. Разработана и изготовлена экспериментальная установка послойного лазерного синтеза изделий ВАРИСКАФ-100МВС с системой создания защитной газовой атмосферы по схеме «глубокий вакуум-наполнение аргоном», позволяющая реализовывать экспериментальные исследования с любыми видами порошковых материалов различного химического состава в условиях глубокого вакуума либо в защитной атмосфере, проводить дегазацию и удаление влаги из порошка непосредственно перед началом синтеза, а также управлять основными технологическими параметрами СЛП.

2. Разработана и рекомендована для практического применения методика предварительной оценки диапазона значений технологических режимов лазерного воздействия для синтеза изделий из медного порошка ПМС-1.

3. Разработаны технологические рекомендации по формированию методом СЛП объемных изделий с изотропным пределом прочности и пористостью из медного порошка отечественного производства марки ПМС-1.

4. Определены условия предварительной механической обработки медного порошка в мельнице-активаторе планетарного типа, позволяющие получить квазиравноосную форму частиц медного порошка ПМС-1 и увеличить его насыпную плотность.

5. Разработаны рекомендации по выбору схемы сканирования лазерным лучом поверхности порошкового материала с разбиением зоны сканирования на подобласти, позволяющей полностью избавиться от дефектов, связанных с расплавлением частиц порошка вне зоны сканирования.

6. Определены рациональные технологические режимы СЛП, на основе кото-

рых разработана и внедрена в производство методика изготовления изделий из медного порошка ПМС-1 на примере формообразующих медных вставок пресс-форм для изготовления литейных восковых моделей.

Методы исследования. Экспериментальные исследования выполнялись в лабораторных условиях с использованием современных методов и аналитических приборов. Реализация процесса СЛП проводилась на разработанной и изготовленной экспериментальной установке ВАРИСКАФ-100МВС. Оценка изменения предела механической прочности образцов реализовывалась на настольной универсальной испытательной системе с двумя колоннами INSTRON 5966. Механическая обработка медного порошка ПМС-1 осуществлялась на планетарной шаровой мельнице АГО-2С. Анализ структуры образцов проводился с помощью оптической микроскопии. Математические зависимости получены на основе теории планирования эксперимента. Тепловые модели процесса СЛП получены методом конечных элементов с использованием современного математического пакета COMSOL Multiphysics.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальная установка селективного лазерного плавления ВАРИСКАФ-100МВС с предварительным прогревом и вакуумированием камеры для синтеза изделий из металлических порошковых материалов, обладающих высоким химическим сродством к кислороду.

2. Результаты экспериментального исследования медного порошка ПМС-1 подвергнутого предварительной обработки в планетарной мельнице, приводящие к увеличению насыпной плотности, снижению теплопроводности и уменьшению размера частиц порошка, позволяющие получать квазиравноосный медный порошок без использования методов атомизации.

3. Математические зависимости предела прочности и пористости изделия из медного порошка от основных технологических параметров СЛП (мощность лазерного излучения, скорость сканирования, толщина слоя порошка), позволяющие определить технологические условия формирования изделий из порошка ПМС-1 с максимальным значением изотропного предела прочности и минимальной пористостью.

4. Технологические рекомендации и методика изготовления изделий с изотропным пределом прочности методом СЛП из отечественного медного порошка несферической формы марки ПМС-1.

Достоверность. Основные научные положения, результаты и выводы, представленные в диссертационной работе, подтверждены результатами эксперимен-

тов, апробацией основных результатов исследования на научно-технических конференциях разного уровня, актом внедрения. Воспроизводимость и достоверность экспериментов подтверждена результатами статистической обработки данных, а также сходимостью с аналогичными результатами других авторов.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследования внедрены на ООО «Юргинский машзавод», г. Юрга Кемеровской области.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на 5-й Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» – г. Юрга (2014г.), Первой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении» – г. Новосибирск (2014г.), Международной научно-технической конференции «Beam Technologies and Laser Application» – Санкт-Петербург (2015г.), Международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» – Москва (2015г.), Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» – г. Томск (2015 г.), Международном семинаре по междисциплинарным проблемам в аддитивных технологиях «Problems of Materials Science in Additive Technologies» – г. Томск (2015г.), на кафедре «Металлургия черных металлов» Юргинского технологического института.

Публикации. По основным результатам исследования и содержанию работы опубликовано 19 печатных работ. Из них 3 – в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 9 – в зарубежных изданиях входящих в базы Scopus и WoS.

Личный вклад автора заключается в разработке и техническом усовершенствовании экспериментального оборудования, планировании, постановке и проведении экспериментов, обработке, обобщении и анализе полученных результатов, подготовке публикаций по тематике данной работы и формулировке основных положений и выводов, выносимых на защиту.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов, заключения и списка литературы из 204 наименований и одного приложения. Основной текст диссертации содержит 186 страниц, включая 89 рисунков, 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, показана степень ее разработанности, определены цели и задачи, решение которых необходимо для

ее достижения, сформулированы научная новизна, практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту, описаны методологии и методы исследования, представлена структура диссертации.

В первой главе представлен аналитический обзор литературных данных о перспективах применения метода СЛП в различных отраслях промышленности, рассмотрены технологические подходы и оборудование для синтеза изделий из металлических порошков с использованием локальных источников нагрева. Основными технологическими параметрами СЛП при синтезе изделий из порошковых материалов являются мощность лазерного излучения, толщина слоя порошка, скорость и схема сканирования, температура порошкового слоя. В большинстве случаев формируемые изделия обладают анизотропными механическими свойствами, пористостью, повышенной шероховатостью поверхности. В процессе СЛП возникает эффект коагуляции, что усложняет процесс формирования новых слоев. Главное требование к порошковым материалам при СЛП – их сферичность, что позволяет достигать хорошей текучести порошка и высокой насыпной плотности при формировании слоя. Однако сложность получения сферического порошка методами атомизации с применением дорогостоящего оборудования приводит к высокой стоимости порошков.

Выяснено, что на сегодняшний день отсутствуют какие-либо технологические рекомендации по формированию функциональных изделий с прогнозируемыми свойствами (пределом прочности, пористостью) методом СЛП из медного порошкового материала, что обуславливает необходимость проведения исследования в этой области.

Во второй главе описаны объекты, методы исследования, экспериментальное оборудование. В качестве порошкового материала для изготовления панели объемных образцов выбран отечественный медный порошок марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-09). Для снижения эффекта коагуляции при СЛП и придания дендритным частицам порошка более равноосной формы предложено обработать порошок в планетарной мельнице АГО-2С при воздействии мелющих тел с ускорением 40g в условиях водяного охлаждения размольных стаканов (далее порошок ММП). Для обработанных порошков определялись размер частиц сухим просеиванием по ГОСТ 18318-94, насыпная плотность методом воронки (ISO 4490) и теплофизические свойства объема порошка методом импульсного теплового воздействия.

С помощью установки СЛП ВАРИСКАФ-100МВС изготавливали образцы кубической формы со сторонами 10x10x10 мм при различных технологических режи-

мах. Образцы подвергали испытаниям на предел прочности в соответствии с ГОСТ 25.503 «Метод испытания на сжатие» с помощью испытательной системы INSTRON 5966. Рассматривали два случая, когда сплавленные слои образцов при нагружении располагаются в горизонтальной ($\sigma_{гор}$) и вертикальной ($\sigma_{вер}$) плоскости относительно поверхности пуансона (рисунок 1). Пористость образцов оценивали методом взвешивания в соответствии с ISO 2738. Для нахождения регрессионной за-

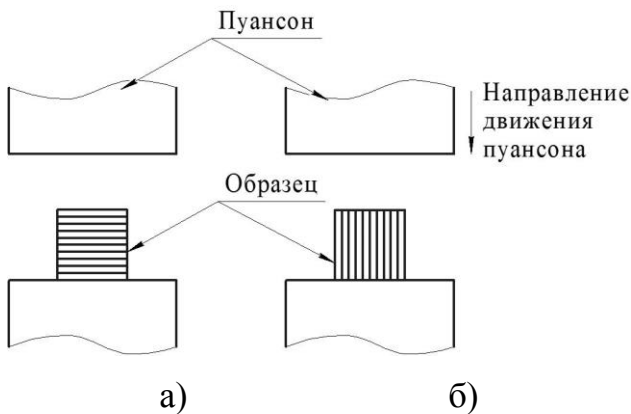


Рисунок 1 – Схема нагружения образцов:
а) – слои в горизонтальной плоскости;
б) – слои в вертикальной плоскости

висимости предела прочности и пористости образцов от мощности лазерного излучения, скорости сканирования и толщины слоя порошка спланирован полный факторный эксперимент типа 2^3 . По результатам экспериментов были выбраны уровни факторов и интервалы их варьирования. Обработка данных осуществлялась на ПК с помощью программ «Microsoft Excel 2010» и «Mathcad 2015».



Рисунок 2 – Общий вид установки ВАРИСКАФ-100МВС

В третьей главе дано описание разработанной и изготовленной экспериментальной установки СЛП ВАРИСКАФ-100МВС (рисунок 2), которая была разработана и изготовлена в ЮТИ ТПУ совместно с ИФПМ СО РАН в рамках проекта РНФ 15-19-00191. Установка ВАРИСКАФ-100МВС представляет собой технологический лазерный комплекс формирования объемных изделий сложной пространственной формы и позволяет контролировать и регулировать ряд технологических параметров процесса СЛП:

мощность лазерного излучения; скорость сканирования; толщину слоя порошка; диаметр пятна лазера в зоне плавления порошка; предварительный нагрев слоя порошка; создание защитной газовой атмосферы. На рисунке 3 представлена принципиальная схема установки. В рабочей камере 9 создается защитная газовая атмосфера с предварительной вакуумной откачкой и последу-

ющим заполнением газом Ar. На рабочий стол с помощью бункерного устройства распределения порошка 7 наносится заданный слой порошкового материала. Толщина наносимого слоя определяется путем опускания рабочего стола на заданную величину с помощью шагового двигателя 6. Слой порошкового материала нагревается до заданной температуры инфракрасным и спиральным нагревателями, управляемыми регулятором 5, после чего начинается процесс СЛП. Лазерное излучение, генерируемое иттербиевым лазером 2, по оптоволоконному проводу 3 попадает в сканатор 4 и с помощью линзы, проходя через рабочее окно 10, фокусируется на поверхности порошка. Перемещение лазерного луча осуществляется с помощью поворота зеркал в сканаторном устройстве 4 в соответствии с управляющей программой персонального

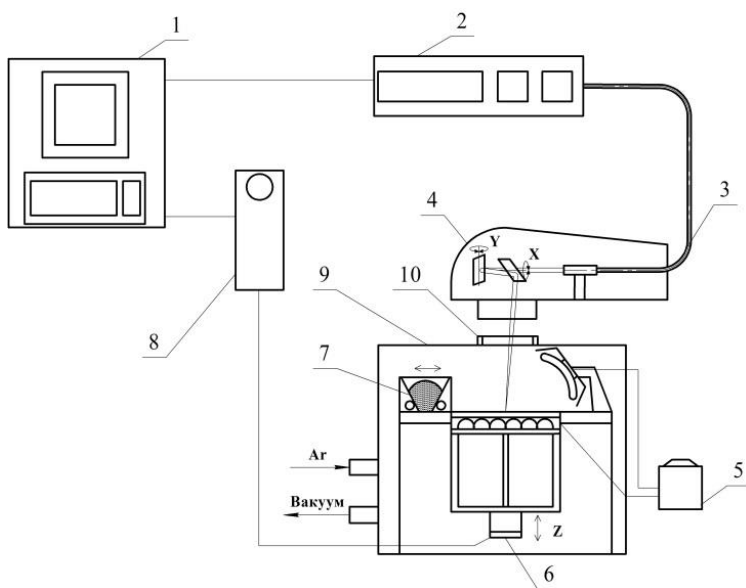


Рисунок 3 – Установка СЛП ВАРИСКАФ-100МВС:
1) персональный компьютер, 2) иттербиевый волоконный лазер, 3) коллиматор, 4) сканатор, 5) регулятор температуры нагрева подложки, 6) узел перемещения стола по оси Z, 7) бункерное устройство распределения порошка, 8) система ЧПУ, 9) вакуумная камера, 10) рабочее окно

компьютера 1. После завершения сплавления первого слоя рабочий стол опускается на требуемую величину и наносится следующий слой порошкового материала. Затем, по заданной программе, нанесенный слой порошкового материала вновь сплавляется. Данный цикл повторяется до полного завершения синтеза изделия. В таблице 1 представлены основные характеристики установки ВАРИСКАФ-100 МВС. Отличием данной установки от существующих является система создания за-

щитной газовой атмосферы с предварительным вакуумированием, прогревом рабочей камеры и последующим заполнением ее аргоном особой чистоты 5.0. Это позволяет сократить удельный расход дорогостоящего газа Ar с 30 л/мин до 2,5 л/мин. Также реализована возможность проводить синтез СЛП в условиях глубокого вакуума. Весь объем порошкового материала подвергается вакуумированию и нагреву перед началом СЛП, что позволяет дегазировать объем порошка и избавиться от влаги в нем. Главным отличием и достоинством экспериментальной установки

Таблица 1 – Технические характеристики ВАРИСКАФ-100МВС

Тип лазера	Иттербиевый волоконный
Мощность лазерного излучения	10-100 Вт
Длина волны лазерного излучения	1070+5 нм
Тип сканирующей системы	Сканатор
Управление перемещением лазера	Ручное/автоматическое
Скорость сканирования	До 11000 мм/с
Подогрев рабочей платформы	Двусторонний, до 300 °С
Формирование порошкового слоя	Автоматическое, бункер
Рабочая зона	100×100×70 мм
Защитная атмосфера	аргон, азот, вакуум
Расход защитного газа	до 2,5 л/мин.
Предварительное разрежение газовой атмосферы	до 1×10^{-4} Па

ВАРИСКАФ-100МВС является возможность реализовать широкий спектр исследований с любыми видами порошкового материала различного химического состава.

В четвертой главе разработана методика определения диапазона основных технологических параметров СЛП на основе модельных тепловых расчетов. Проведен анализ отечественных и зарубежных научно-исследовательских работ, посвященных моделированию процессов взаимодействия лазерного излучения с порошковым материалом при СЛП. На основе анализа методов и подходов моделирования тепловых процессов взаимодействия лазерного излучения с твердым телом для предварительной оценки распределения температуры в слое медного порошкового материала предложена тепловая конечно-элементная модель сплавления единичного трека по заданной траектории, схема которой представлена на рисунке 4. В предлагаемой модели распределение тепла в теле образца происходит за счет теплопроводности порошка в соответствии с уравнением:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q, \quad (1)$$

где T – температура; ρ – плотность; C – теплоемкость; k – коэффициент теплопроводности; Q – возникающее или поглощаемое тепло.

Воздействие лазерного излучения определяется как объемный источник тепла, интенсивность которого связана с мощностью лазерного воздействия на различной глубине порошкового слоя. Уравнение, определяющее теплоту от лазерного воздействия, имеет вид:

$$Q(x, y, z) = Q_0(1-R_c) \cdot \frac{A_c}{\pi \sigma_x \sigma_y} e^{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right]} \cdot e^{-A_c z}, \quad (2)$$

где Q_0 – мощность лазерного излучения; R_C – коэффициент отражения; A_C – коэффициент поглощения; $e^{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right]}$ – 2D Гауссово распределение мощности излучения по поверхности образца в плоскости x, y ; $e^{-A_C z}$ – экспоненциальный спад мощности по глубине слоя (закон Бугера).

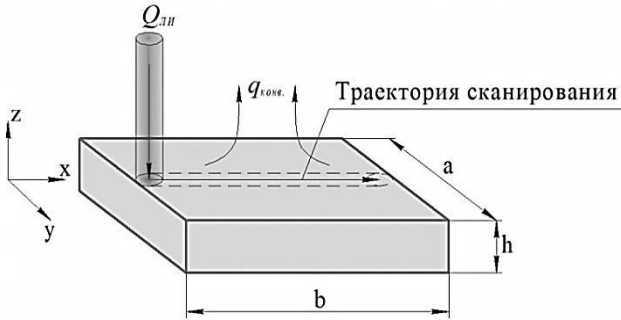


Рисунок 4 – Схема модели сплавления

При реализации модели приняты следующие допущения: теплопроводность порошка и коэффициенты R_C, A_C постоянны; объем порошка считается полубесконечным телом; тепловые потери учитываются в виде естественной конвекции и теплового излучения с верхней поверхности слоя порошка;

скрытая теплота плавления порошка не учитывается; распределение тепла в теле образца происходит только за счет теплопроводности. Результаты расчета позволили провести анализ изменения ширины и толщины сплавленного трека от скорости сканирования и мощности лазерного излучения (рисунок 5). Выбран диапазон технологических параметров, при которых расчетная толщина сплавленного трека больше или равна толщине слоя порошка: мощность лазерного излучения $P = 10\text{--}40$ Вт; скорость сканирования $v = 26\text{--}66$ мм/с; толщина слоя порошка $h = 0,1\text{--}0,2$ мм. Эксперименты по уточнению диапазона значений технологических параметров СЛП объемных образцов из порошка марки ПМС-1 показали, что механически прочные образцы (образцы не разрушались при извлечении из установки) получались при следующих режимах: мощность лазерного излучения $P = 15\text{--}30$ Вт; скорость сканирова-

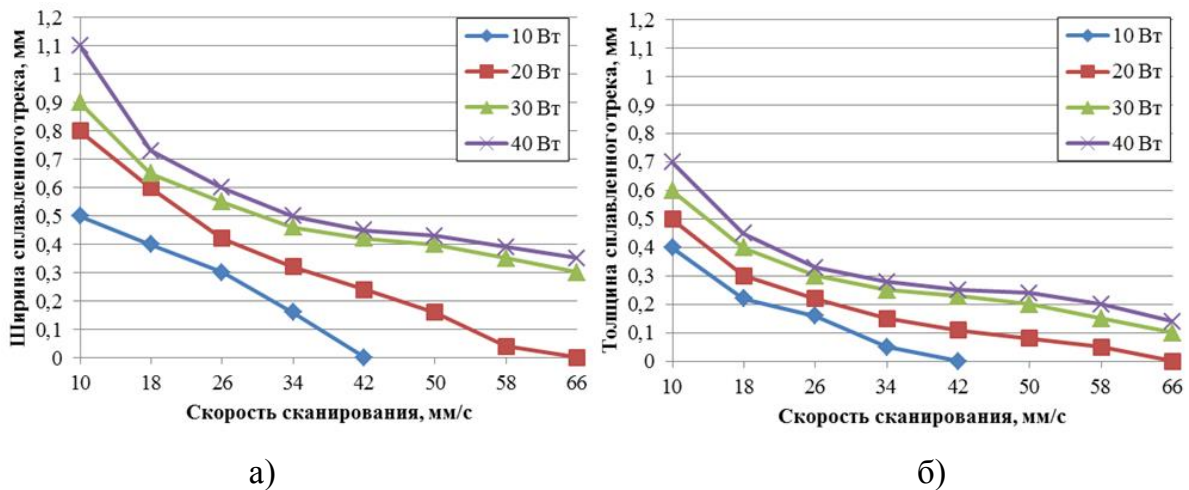


Рисунок 5 – расчетные значения ширины (а) и толщины (б) сплавленного трека от скорости сканирования и мощности лазерного излучения

ния $v = 34\text{--}50$ мм/с; толщина слоя порошка $h = 0,1\text{--}0,2$ мм; температура подогрева слоя порошка $t_{\text{п}} \geq 300$ °С.

В пятой главе представлены основные результаты расчетов и экспериментов. В исходном состоянии частицы порошка ПМС-1 представляют собой вытянутую форму и имеют дендритную структуру (рисунок 6, а), при этом около 75% частиц имеют размер 20-64 мкм. В процессе обработки в планетарной мельнице под ударным воздействием мелющих тел происходит разрушение дендритов 3–4-го порядка, частицы измельчаются, уплотняются и принимают квазиравноосную форму (рисунок 6, б). При увеличении времени обработки порошка до 3 минут (рисунок 6, в) преобладает процесс образования крупных (до 500 мкм) конгломератов, доля мелких частиц порошка уменьшается. В общем случае наблюдается увеличение насыпной плотности порошка на 36-44 % относительно исходного порошка ПМС-1 (рисунок 7).

Для определения оптимального времени обработки в планетарной мельнице из полученных порошков методом СЛП изготавливались образцы размером $10 \times 10 \times 5$ мм при равных технологических условиях. Наименее пористым ($\Pi = 39\%$) по отношению к другим получился образец из порошка после 1,5-минутной обработки. Для дальнейших экспериментов и изготовления объемных образцов использовались порошки ПМС-1 и медный обработанный при 1,5 минутах в планетарной мельнице порошок (далее ММП-1.5). Теплофизические характеристики для выбранных порошков, определенные экспериментально, представлены в таблице 2.

На основе планирования эксперимента и статистической обработки экспериментальных данных, получены регрессионные зависимости предела прочности на сжатие и пористости от технологических параметров СЛП, которые позволили

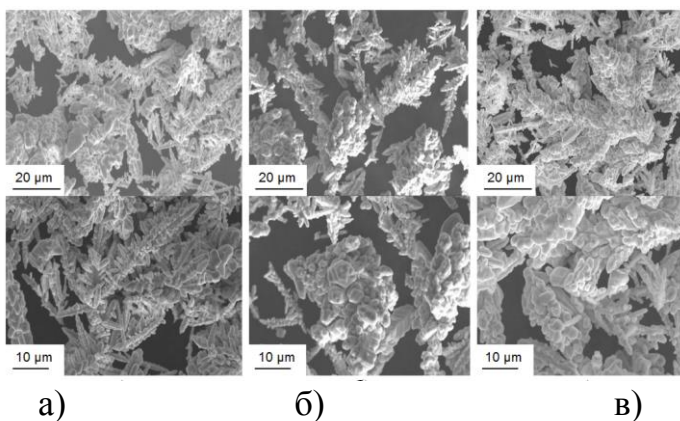


Рисунок 6 – Изменение морфологии ПМС-1 от времени обработки:
а – 0 мин.; б – 1,5 мин.; в – 3 мин.

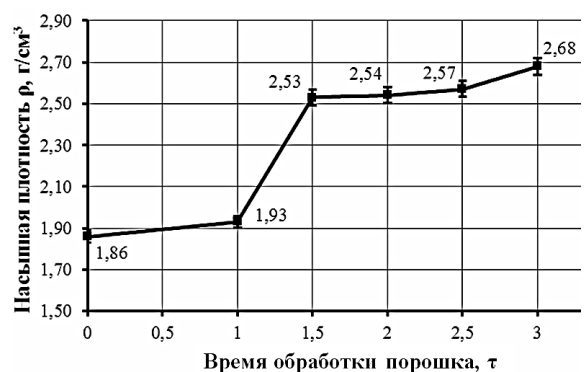


Рисунок 7 – Изменение насыпной плотности порошка ПМС-1

Таблица 2 – Теплофизические характеристики объема порошка (экспериментальные)

Порошок	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Теплоемкость, Дж/(м ³ ·°С)	Температуропроводность, м ² /с	Насыпная плот., г/см ³
ПМС-1	$3,6 \times 10^{-3}$	6,1	0,017	1,86
ММП-1.5	$0,24 \times 10^{-3}$	6,68	0,013	2,55

определить технологические условия формирования образцов с максимальным значением предела прочности и минимальной пористостью. Анализ регрессионных зависимостей позволил установить, что для образцов, изготовленных из порошка ПМС-1 методом СЛП при толщине слоя порошка $h = 0,1$ мм, мощности лазерного излучения $P = 30$ Вт и скорости сканирования $v = 50$ мм/с предел прочности достигает наибольшего значения как для случая направления вектора нагрузки перпендикулярно сплавленным слоям ($\sigma_{гор} > 104$ МПа), так и вдоль сплавленных слоев ($\sigma_{вер} > 104$ МПа), пористость достигает минимального значения $\Pi = 13\%$. При одинаковых условиях СЛП предел прочности образцов из порошка ММП-1.5 существенно ниже ($\approx 20\%$), чем у образцов из порошка ПМС-1, что связано с увеличением насыпной плотности порошкового материала. Получение механически прочных образцов с низкой пористостью из порошка ММП-1.5 возможно при более высоких мощностях лазерного излучения (40-50 Вт и более). Полученные результаты позволяют расширить диапазон функциональных свойств изделий, синтезированных из медного порошка методом СЛП.

В шестой главе проведен анализ структуры полученных образцов из порошка ПМС-1, оценена степень влияния основных технологических параметров СЛП на предел прочности и пористость изделий. Установлено, что наибольшее влияние оказывают толщина слоя порошка и мощность лазерного излучения. Скорость сканирования оказывает влияние в меньшей степени. Для оценки влияния стратегии сканирования на процесс СЛП из порошка ПМС-1 были изготовлены образцы в форме прямоугольного параллелепипеда размерами $6 \times 6 \times 30$ мм на режимах, при которых достигались наибольшие значения предела прочности (рисунок 8).



$P = 30$ Вт; $v = 34$ мм/с; $h = 0,1$ мм

Рисунок 8 – Образец, полученные СЛП из порошка ПМС-1

В процессе синтеза во второй половине цикла сплавления слоя по боковым граням образцов образовались дефекты в виде оплавленных частиц порошка вне зоны сканирования. Для выявления причин образования дефектов была построена

тепловая модель сплавления единичного слоя по заданной схеме в соответствии с технологическими параметрами СЛП. Детальный анализ изменения температуры

поверхности порошка вдоль исследуемой границы (рисунок 9), располагающейся на расстоянии 0,3 мм от края зоны сканирования в области свободно насыпанного порошка, показал, что во второй половине цикла сплавления слоя (координата $X=0-15$ мм) происходит интенсивный нагрев порошка до температуры плавления и выше (рисунок 10).

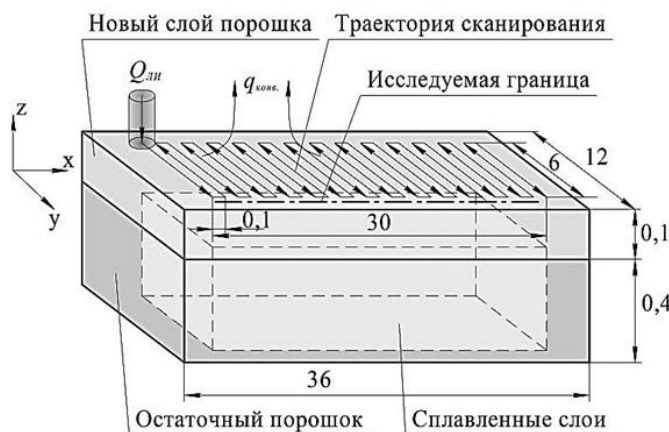


Рисунок 9 – Схема модели сплавления единичного слоя

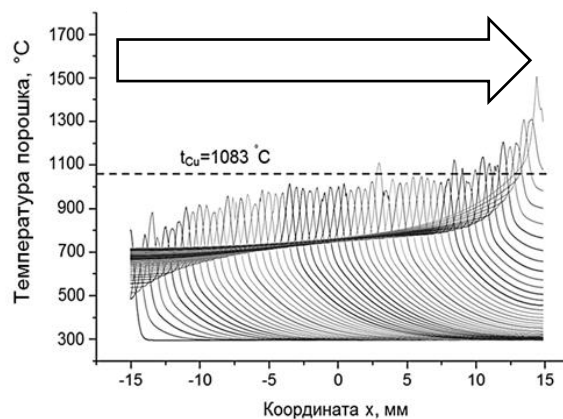


Рисунок 10 – Изменение температуры порошка вдоль боковой границы зоны сплавления (стрелкой показано смещение температурного фронта)

Разбив область сканирования на участки и сканировав их по схеме «друг к другу» удалось снизить температуру порошка вне зоны сканирования ниже температуры плавления (рисунок 11). При таких условиях порошок по бокам зоны сканирования будет успевать остывать за счет конвекции и теплоотвода в тело сплавленного образца, подложку и «свободный» порошок. На основании полученных экспериментальных данных и анализа регрессионных зависимостей определены рациональные технологические режимы СЛП медного порошка ПМС-1, при которых предел прочности образца относительно сплавленных слоев был изотропен и имел наибольшее значение. По результатам проведенных исследований с целью определения рациональных технологических режимов СЛП порошка

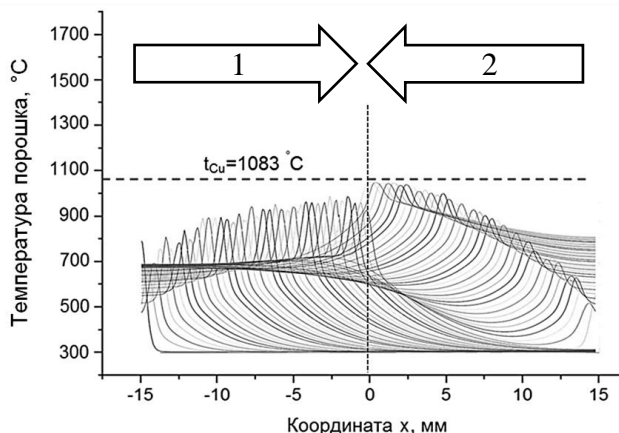
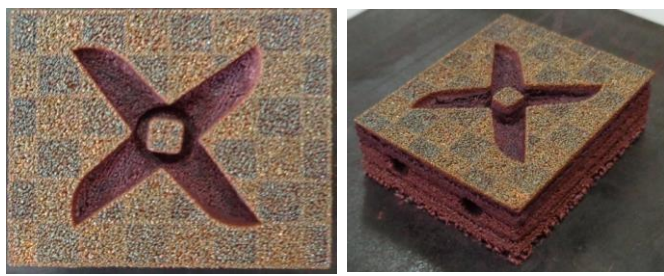


Рисунок 11 – Изменение температуры порошка вдоль боковой границы зоны плавления при изменении схемы сканирования (стрелками показано смещение температурного фронта)

определены рациональные технологические режимы СЛП медного порошка ПМС-1, при которых предел прочности образца относительно сплавленных слоев был изотропен и имел наибольшее значение. По результатам проведенных исследований с целью определения рациональных технологических режимов СЛП порошка



а)

б)

Рисунок 12 – Медная формообразующая вставка, изготовленная СЛП медного порошка ПМС-1: а) вид сверху; б) общий вид

ПМС-1 разработана и внедрена в производство методика изготовления изделий из медного порошка на примере медной формообразующей вставки для пресс-формы с конформными каналами охлаждения (рисунок 12). Габаритный размер формообразующей вставки составляет $63 \times 44 \times 20$ мм. Технология изготовления пресс-

форм методом СЛП была внедрена в производственный процесс цеха точного литья на ООО «Юргинский машзавод». Данная технология позволила сократить время изготовления пресс-формы в 2,4 раза, увеличить коэффициент использования материала до 92 % и уменьшить себестоимость изготовления пресс-формы на 30 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и изготовлена экспериментальная программно управляемая установка послойного лазерного синтеза изделий ВАРИСКАФ-100МВС, позволяющая регулировать основные технологические параметры СЛП: мощность лазерного излучения; скорость сканирования, толщину слоя порошка, диаметр пятна лазерного излучения, схему сканирования, температуру нагрева слоя порошка. Конструкция установки позволяет реализовывать экспериментальные исследования с любыми видами порошковых материалов различного химического состава в условиях защитной газовой атмосферы или глубокого вакуума, производить дегазацию и сушку всего необходимого объема порошка непосредственно перед началом СЛП.

2. Экспериментальным путем установлены технологические условия получения квазиравноосного медного порошка без использования методов атомизации путем обработки медного порошка ПМС-1 в планетарной мельнице АГО-2С, позволяющие изменить форму частиц порошка с дендритной до квазиравноосной, увеличить долю мелкой фракции порошка (<40 мкм) до 70%, тем самым увеличив насыпную плотность порошка на 36% относительно исходного состояния.

3. Разработана методика оценки диапазона значений основных технологических параметров СЛП объемных образцов из металлического порошка, состоящая из следующих этапов:

- построение методом конечных элементов тепловой математической модели

сплавления единичного трека под воздействием движущегося лазерного луча;

- анализ изменения ширины и глубины зоны плавления в соответствии с рассчитанным интервалом температур, превышающих температуру плавления порошкового материала, и предварительное определение диапазона значений мощности лазерного излучения и скорости сканирования, при которых глубина зоны плавления будет больше или равна толщине порошкового слоя;

- уточнение предварительно выбранного диапазона значений технологических параметров.

4. В результате математического моделирования и экспериментальных исследований определены рациональные технологические режимы (мощность лазерного излучения – 30 Вт, скорость сканирования – 50 мм/с, толщина слоя порошка – 0,1 мм, температура порошка – 300°C, диаметр пятна лазера – 0,2 мм) СЛП медного несферического отечественного порошка ПМС-1, при которых в полученных объемных изделиях достигается максимальный изотропный предел прочности ($\sigma_b = 104$ МПа) и минимальная пористость ($\Pi = 13$ %).

5. В результате математического моделирования плавления единичного слоя под воздействием лазерного излучения определены схемы сканирования лучом поверхности порошка при синтезе объемного изделия методом СЛП, позволяющие полностью избавиться от дефектов, связанных с расплавлением частиц порошка вне зоны сканирования.

6. На основе предложенных технологических рекомендаций разработана и внедрена в производство методика изготовления изделий методом СЛП медного порошка ПМС-1 на примере медной формообразующей вставки для пресс-формы с конформными каналами охлаждения, которая рекомендована для применения в опытном и мелкосерийном производстве моделей для литейного производства.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий:

1. Ибрагимов Е.А. Сравнение способов активации медного порошка ПМС-1 для синтеза изделий методом SLS /Е.А. Ибрагимов, А.А. Сапрыкин, В.И. Яковлев, А.В. Градобоев, Е.В. Бабакова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015 – №. 3 (68). – С. 82–88.

2. Ибрагимов Е.А. Влияние условий послойного лазерного спекания (плавления) на качество поверхности изделия / А.А. Сапрыкин, Н.А. Сапрыкина, Е.В. Бабакова, Ю.П. Шаркеев, Е.А. Ибрагимов // Фотоника. – 2016. – № 1 (55). – С. 40–48.

3. Ибрагимов Е. А., Шаркеев Ю.П., Ковалевская Ж.Г., Химич М. А., Сапрыкин А. А., Яковлев В.И., Батаев В. А Исследование строения и фазового состава порошков Ti и Nb после механической активации // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2016 – №. 1 (70) – С. 42-51

В зарубежных изданиях, входящих в базу Scopus:

1. Ibragimov E.A., Gradoboev A.V., Babakova E.V., Saprykin A.A. Layer-By-Layer Laser Sintering Of Powders Irradiated By Gamma Quanta Co60 // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1040. – P. 768–771.

2. Ibragimov E.A., Saprykin A.A., Babakova E.V. Influence of Laser Beam Machining Strategy at SLS Synthesis // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1040. – P. 764–767.

3. Ibragimov E.A., Saprykin A.A., Yakovlev V.I. Influence of mechanical activation of powder on SLS process // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 682. – P. 143–147 .

4. Ibragimov E.A., Babakova E.V., Gradoboev A.V., Saprykin A.A., Yakovlev V.I., Sobachkin A.V. Comparison of Activation Technologies Powder ECP-1 for the Synthesis of Products Using SLS // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 756. – P. 220–224.

5. Ibragimov E.A., Saprykin A.A., Babakova E.V., Dudikhin D.V. Prospects of Creating Products Using Selective Laser Sintering // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 770. – p. 608–611.

6. Ibragimov E.A., Saprykin A.A., Babakova E.V. Fiber-Reinforced Composites in Rapid Prototyping Technologies // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 770. – P. 185–188.

7. Ibragimov E.A., Saprykin A.A., Babakova E.V. Engineering And Technology Based On Rapid Prototyping // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 770. – P. 622–627.

8. Ibragimov E.A., Saprykin A.A., Babakova E.V., Yakovlev V.I. Influence of Mechanical Activation of Copper Powder on Physicomechanical Changes in Selective Laser Sintering Products // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1683, Article number 020199. – P. 1–4.

9. Ibragimov E.A., Saprykin A.A., Babakova E.V. Modeling the Temperature Fields of Copper Powder Melting in the Process of Selective Laser Melting [Electronic resource] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 142 : Innovative Technologies in Engineering. – [012061, 9 p.].

Подписано к печати __.__.____. Формат 60×84/16.
Объем – 1 усл. печ. Л. Тираж 100 экз. Наряд № 52/1
Отпечатано на ризографе в ЮФ ФГУП «НИИСУ»
652050, г. Юрга, Кемеровской обл., ул. Шоссейная, 1, тел. 3-97-09