

На правах рукописи
УДК 621.792.3

Денежкин Антон Олегович

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ
МОЛИБДЕНОВОГО СПЛАВА МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО
ПЛАВЛЕНИЯ

2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет)

Научный руководитель:

Колчанов Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Низьев Владимир Григорьевич

доктор физико-математических наук,
профессор, ИПЛИТ РАН – филиал Федерального
государственного учреждения «Федеральный
научно-исследовательский центр
«Кристаллография и фотоника» Российской
академии наук»

Дерябин Максим Николаевич

кандидат технических наук,
АО «Научно-исследовательский
институт точных приборов»

Ведущая организация: ФГАО УВО «Московский политехнический
университет», город Москва.

Защита состоится «___» _____ 2023 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 при Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.02,
кандидат технических наук, доцент

А.В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Технология производства деталей из тугоплавких металлов, в частности молибдена, трудоемкий и дорогостоящий процесс. В первую очередь это связано в высокой температурой плавления ($2\ 620\ ^\circ\text{C}$), окисляемостью при температурах выше 600°C и хрупкостью при комнатных температурах. Но благодаря своим теплофизическими свойствам, жаропрочные сплавы молибдена востребованы в авиационной, ракетно-космической, энергетической и других отраслях промышленности. Высокая сложность обработки полуфабрикатов из молибдена традиционными методами производства (гибка, вальцовка, сварка, резка, токарная и фрезерная обработка, и др.) серьезно ограничивают области применения из-за высокой стоимости конечной детали, возникающих дефектов (трещины, расслоения) или сложной геометрии детали.

Технология аддитивного производства - селективное лазерное плавление (СЛП) - может значительно сократить цикл изготовления деталей из жаропрочного молибденового сплава. Высокая геометрическая свобода, присущая аддитивным технологиям, расширит возможности применения молибдена в качестве конструкционного материала для изготовления деталей со сложной геометрией. Кроме того, детали, выращенные методом СЛП, характеризуются высокой относительной плотностью, относительно высокой точностью ($\pm 50\ \text{мкм}$), а высокие скорости нагрева и охлаждения обеспечивают мелкий размер зерна и повышение механических характеристик. Ряд исследовательских коллективов (Карпов (ИФТТ РАН), D. Faidel (Central Institute of Engineering, Германия), J. Braun (University of Innsbruck, Австрия), D. Wang (Laboratory of New Ceramic and Fine Processing, Китай)), проявляют большой интерес к СЛП молибденовых сплавов. Существует целый ряд до сих пор нерешенных проблем, связанных с тем, что молибден в процессе СЛП подвержен образованию трещин и объемной пористости. Помимо хладноломкости молибденовых сплавов при комнатной температуре к образованию трещин приводят примеси внедрения, выделяющиеся на границе зерен. Так как представленная технология основана на послойном формировании детали за счет сплавления единичных дорожек лазерным лучом, понимание механизма формирования единичной дорожки, влияния параметров и условий процесса на образование трещин и объемной пористости, позволит существенно снизить указанные дефекты и использовать технологию СЛП для выращивания деталей из молибденового жаропрочного сплава со сложной геометрией и значительно снизить трудоемкость в целом.

Цель работы: Разработка технологии изготовления изделий методом селективного лазерного плавления из молибденового сплава ЛМ-2 с использованием моделирования процесса выращивания.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Выявление влияния технологических параметров СЛП на поведение жидкой ванны и геометрическую стабильность формируемых при кристаллизации единичных дорожек.
2. Численное моделирование процесса селективного лазерного плавления молибденового сплава с учетом основных физических процессов: конвективные потоки ванны расплава, силы отдачи паров, расплавление и затвердевание ванны расплава.
3. Определение диапазона оптимальных режимов выращивания для формирования стабильных единичных дорожек без пор и несплавлений из молибденового сплава с использованием результатов численного моделирования.
4. Экспериментальное подтверждение достоверности построенной численной модели в сопоставлении с расчетными данными.
5. Определение окончательных режимов СЛП сплава ЛМ-2 из диапазона, полученного в результате моделирования, путём выращивания образцов на металлографические исследования структуры и пористость.
6. На режиме, обеспечивающем минимальную пористость вырастить образцы и провести механические испытания на прочность и твердость.
7. На основе проведенного моделирования и экспериментальных исследований разработать технологию выращивания устройства перемешивания жидкого стекла из сплава ЛМ-2.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Установлено влияние скорости и мощности лазерного излучения на скорости конвективных потоков жидкости в ванне расплава материала и определен диапазон удельной энергии 330 – 370 Дж/мм³ и скорости сканирования 480 – 520 мм/сек, при которых скорости жидкой ванны находятся в диапазоне от 3 до 4 м/с и не приводят к выплеску материала. При этом обеспечивается коэффициент стабильности формирования единичной дорожки не более 0,05.
2. Впервые установлена зависимость коэффициента нестабильности единичной дорожки от мощности и скорости сканирования. С увеличением мощности лазерного излучения с 300 до 400 Вт коэффициент нестабильности снижался с 0,042 до 0,033. Увеличение скорости сканирования приводило к повышению коэффициента нестабильности. Так при скорости 500 мм/с и 800 мм/с коэффициент нестабильности составил 0,037 и 0,086 соответственно.
3. Установлено влияние размера частиц порошка ЛМ-2 на стабильность формирования ванны расплава. Частицы с размером менее 15 мкм приводят к провалам высоты единичной дорожки при остывании, а частицы с размером

более 45 мкм наоборот – к увеличению ширины и высоты единичной дорожки, при этом коэффициент стабильности сформированной дорожки превышает значение 0,05.

4. Определено, что наличие дополнительного подогрева подложки выращивания влияет на глубину и ширину ванны расплава. Подогрев до температуры 473 К увеличивает глубину проплавления на 4,94 %, а до температуры 673 К, на 9,23%. Подогрев подложки практически не влияет на ширину единичной дорожки. При этом происходит снижение скорости охлаждения со значений 3×10^9 К/с до 5 – 6×10^8 К/с.
5. Определены диапазоны удельной энергии 330 – 370 Дж/мм³ и скорости сканирования 480 – 520 мм/сек, использование которых на отечественном оборудовании СЛП-250 позволило получить образцы из молибденового сплава ЛМ-2 с пористостью менее 1% и отсутствием трещин. Указанные диапазоны удельной энергии и скорости обеспечивают высокие скорости охлаждения и формирование сравнительно мелких столбчатых зёрен, максимальная длина которых не превышала 500 – 550 мкм, что позволило достичь высоких механических характеристик сплава ЛМ - 2 при СЛП: $\sigma_b = 800$ МПа, микротвёрдость = 370 HV.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. При помощи моделирования процесса СЛП выявлено влияние основных технологических параметров (мощность лазера, скорость сканирования и температура подогрева подложки выращивания) на поведение жидкой ванны и геометрическую стабильность формируемых при её остывании единичных дорожек.
2. Разработана методика моделирования процесса СЛП, которая позволила существенно сузить окно технологических параметров и снизить количество необходимых экспериментов с целью определения режимов, обеспечивающих отсутствие трещин, пористость менее 1%, мелкозернистую столбчатую структуру и, как следствие, высокие механические характеристики, таких как прочность и микротвердость.
3. На основе результатов моделирования разработана технология выращивания изделий из молибденового сплава ЛМ-2 методом СЛП, позволяющая значительно снизить трудоемкость изготовления деталей из молибденового сплава, а также открывающая новые области применения в различных отраслях промышленности.

Методы исследования включали в себя теоретические и экспериментальные методы. Моделирование процесса СЛП из молибденового сплава проводилось с использованием программных продуктов Flow 3D, DEM, WELD и Paraview. Все образцы из молибденового сплава: единичные дорожки, образцы для

металлографических исследований и образцы для механических испытаний выращены в одинаковых условиях на отечественной установке СЛП-250, разработанной в МГТУ им. Н. Э. Баумана. Исследования микрошлифов на микроструктуру и пористость, а также изломов образцов на разрыв проводилось на оптическом микроскопе Olympus GX53 и на электронном микроскопе Phenom Pharos. Пористость материала матрицы дополнительно измерялась на метрологическом компьютерном томографе GE PHOENIX V.

Достоверность подходов к численному моделированию процессов лазерного плавления подтверждается использованием современного верифицированного программного обеспечения и проверкой его применимости. В полученных результатах отсутствуют нефизические значения. Сравнение рассчитанных параметров с экспериментом показало хорошее соответствие. Полученные результаты обеспечиваются корректным применением основных положений естественных наук при проведении расчётных исследований, осуществлением измерений на аттестованном измерительном оборудовании по стандартным методикам и использованием ранее проверенных принципов при создании новых испытательных приспособлений. Достоверность подтверждается экспериментальными данными, обработанными с помощью методов статистического анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Установленные зависимости коэффициента нестабильности формирования единичной дорожки из молибдена от удельной энергии и толщины порошкового слоя.
2. Установленные температурные циклы при многодорожковом селективном лазерном плавлении.
3. Установленные диапазоны оптимальных технологических режимов выращивания изделий из жаропрочного молибденового сплава ЛМ-2.

Апробация работы:

1. Научно-техническая конференция «Студенческая научная весна» (Москва, 2021, 2022 г.)
2. VII Международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (Москва, 2021 г.)
3. XIV Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроение России» (Москва, 2021).
4. Доклады автора на научных семинарах кафедры «Лазерные технологии и оборудование» кафедры МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2019-2022 г.)

Публикации:

Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены в 9 научных работах, в том числе в 3 публикациях в изданиях «Перечня ведущих периодических изданий ВАК РФ» и 2-х статьях в журнале, индексируемом в базе данных SCOPUS.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, заключения, списка литературы из 121 наименования. Работа содержит 148 страниц машинописного текста, в том числе 24 таблицы и 57 рисунков.

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

В Главе 1 представлен литературный обзор, посвященный технологическим особенностям СЛП и методам борьбы с дефектами. Обоснована актуальность темы исследования. Рассмотрены методы получения полуфабрикатов из молибденового сплава. Проведен анализ современного состояния исследований в области СЛП молибдена и его сплавов. Освещены существующие проблемы и нерешенные задачи. Материалы главы послужили основанием для постановки цели и задач исследования.

Из-за специфических свойств молибдена изготовление деталей из молибдена с использованием традиционных методов производства является очень трудоемкой задачей и требует большого числа технологических процессов. Главными причинами сложности обработки молибдена выступает высокая температура плавления и перехода из хрупкого состояния в пластичное, а также высокая окисляемость при повышенных температурах, что требует применения специализированного оборудования для изготовления деталей. Кроме того, области применения молибденовых сплавов характеризуются высокими нагрузками и температурами, что накладывает серьезные требования к прочности соединений. Поэтому включение в номенклатуру материалов для СЛП молибдена, является актуальной задачей. Технология СЛП позволит в значительной степени снизить технологический путь производства изделий из молибдена, а также позволит изготавливать детали со сложной геометрией и внутренними структурами. Но для этого необходимо преодолеть ряд трудностей, связанных с высокими значениями пористости и трещинообразованием при СЛП молибдена.

В Главе 2 представлено описание численной математической модели, описывающей СЛП единичной дорожки из молибденового порошкового материала. Для имитации процесса СЛП с высокой достоверностью и максимально приближенными условиями к эксперименту были использованы различные подходы для моделирования основных этапов процесса. В расчетной модели

учитываются процессы плавления и затвердевания, распределение плотности мощности лазерного источника, переотражения лазерного излучения, испарение материала, силы давления отдачи паров и усадка затвердевшего материала.

Для описания взаимодействия частиц порошка при формировании порошкового слоя использовался метод дискретных элементов. Это позволило рассчитать движение большого количества частиц, определить траекторию движения, скорость и силы, действующие на частицы. Расчет физических параметров в каждом узле расчетной сетки проводился с помощью метода конечных элементов. Для отслеживания и определения фазовых переходов между твердой и жидкой фазой использовался метод объема жидкости.

Для расчета температуры, давления и в общем случае трех составляющих вектора скорости решались пять дифференциальных уравнений конвективного теплообмена: уравнение неразрывности (1), уравнение Фурье-Кирхгофа (2) и уравнение Навье-Стокса для трех компонентов скорости (3).

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} \quad (1)$$

Где V_F – частичный объем, открытый для потока, ρ – плотность жидкости, R_{DIF} – член турбулентной диффузии, $A_{x,y,z}$ – доля площади открытая для потока в направлении x,y,z.

уравнение Фурье-Кирхгофа

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{u} \nabla T \right) = \operatorname{div}[\lambda \operatorname{grad}(T)] + q_v + \mu \Phi - p \operatorname{div}(\vec{u}) \quad (2)$$

Где $\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right)$ – изменение внутренней энергии элементарного объема текучей среды во времени, $\rho c \vec{u} \nabla T$ – конвективный член уравнения энергии, учитывающий перенос теплоты за счет движения среды, $\operatorname{div}[\lambda \operatorname{grad}(T)]$ – диффузионный член уравнения, учитывающий перенос теплоты теплопроводностью, q_v – источниковый член уравнения, учитывающий поступление или убыль энергии за счет действия внутренних источников или стоков теплоты; $\mu \Phi$ – слагаемое уравнения энергии, учитывающее нагрев текучей среды вследствие диссипации кинетической энергии движения за счет трения (Φ -диссипативная функция), μ – динамический коэффициент вязкости, $p \operatorname{div}(\vec{u})$ – слагаемое уравнения энергии, учитывающее изменение энергии жидкости при ее идеальном сжатии или расширении.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \frac{A_y v^2}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + G_x + f_x - b_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - \frac{A_y u v}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + G_z + f_z - b_z \end{aligned} \quad (3)$$

Где (u, v, w) – компоненты скорости жидкости, G_x, G_y, G_z – ускорение тела, f_x, f_y, f_z – вязкие ускорения, b_x, b_y, b_z – представляют собой потери потока в пористой среде или через пористые перегородки, а окончательные члены учитывают инжекцию массы в источнике, представленном компонентом геометрии.

Совокупность численных методов и основополагающих физических уравнений позволило построить численную модель формирования единичной дорожки в процессе СЛП.

В Главе 3 представлены результаты численной модели по формированию порошкового слоя и влияния параметров СЛП на формирование единичной дорожки. С помощью моделирования определен диапазон значений удельной энергии, при котором наблюдается формирование единичной дорожки. Рассмотрена эволюция ванны расплава и температурного поля в процессе СЛП. Установлено влияние дополнительного подогрева подложки и размера частиц в порошковом слое на коэффициент стабильности единичной дорожки.

На основе данных гранулометрического и морфологического анализа был смоделирован порошковый слой с частицами порошка, соответствующими реальным частичкам порошка молибденового сплава, используемого для проведения экспериментов. После окончания моделирования процесса формирования порошкового слоя из выходного файла порошковый слой был экспортирован в формат .STL и использовался в моделировании формирования единичной дорожки методом СЛП.

В качестве основной характеристики полученных единичных дорожек с помощью численной модели был установлен коэффициент нестабильности.

$$R_{\text{нестаб}} = \sqrt{\frac{\sum(K_i - K_{\text{ср}})^2}{n}} \quad (4)$$

Где K_i – коэффициент проплавления на i -ом шаге измерения, $K_{\text{ср}}$ – средний коэффициент проплавления по длине единичной дорожки. n – количество точек измерения.

Единичная дорожка считалась равномерной при $R_{\text{нестаб}} \leq 0.05$, что свидетельствует об отсутствии резких перепадов по ширине и глубине единичной дорожки по ее длине. Применение коэффициента проплавления позволяет охарактеризовать форму сплавленной дорожки, учитывая ее ширину и высоту, а также режим плавления (поверхностный, глубокий, кинжалное проплавление).

Далее проводилось моделирование процесса СЛП по формированию единичных дорожек при различных значениях основных параметров процесса. В результате проведенного моделирования был определен диапазон значений удельной энергии для порошкового слоя 30 и 40 мкм, при котором коэффициент нестабильности не превышал 0.05 (Рисунок 1).

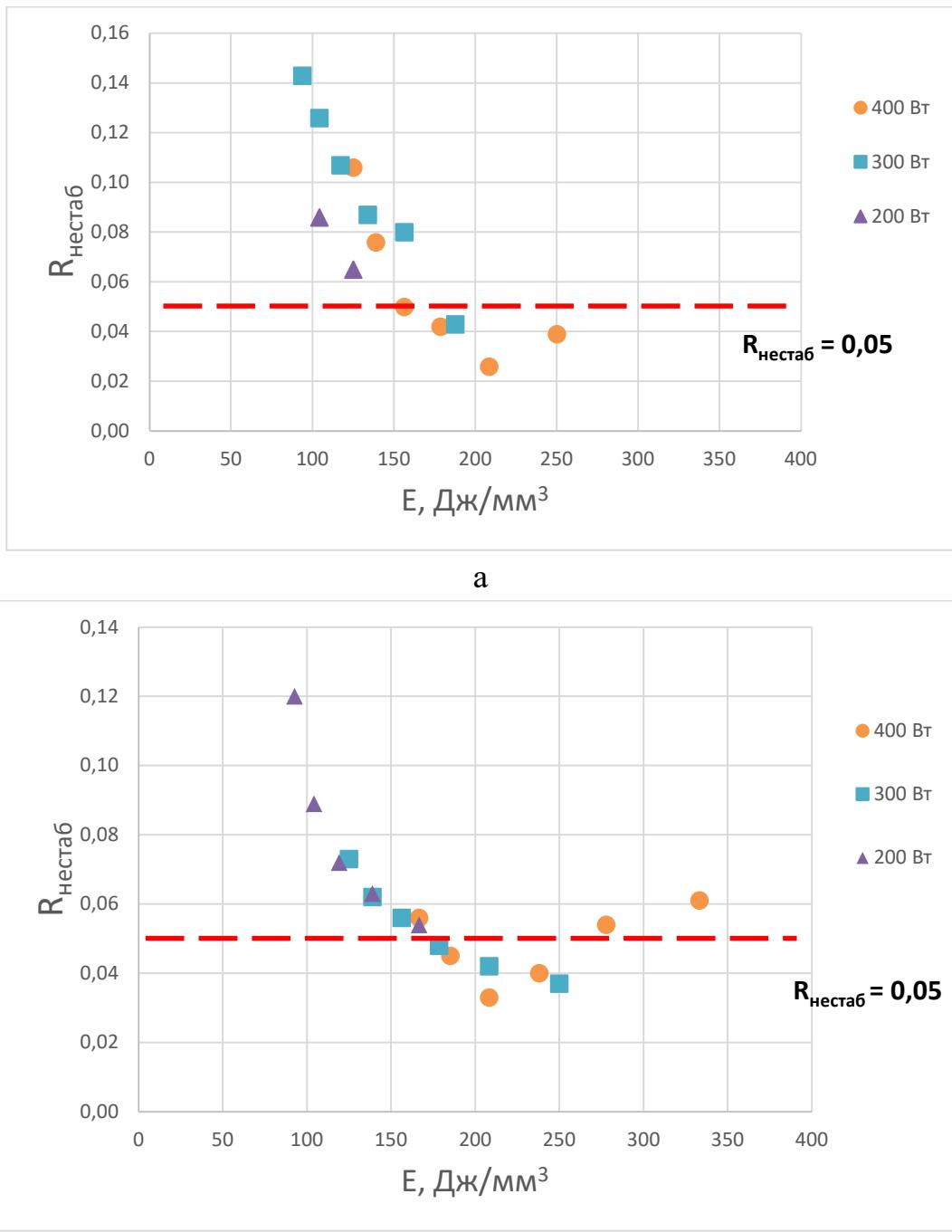


Рисунок 1. Значения коэффициента стабильности, спрогнозированные численной моделью в зависимости от удельной энергии при толщине слоя: а – 30 мкм, б – 40 мкм.

Уменьшение толщины слоя до 30 мкм увеличивает вводимую удельную энергию в слой, что позволяет применять источники лазерного излучения меньшей мощности (Рисунок 2).

Таким образом установлена взаимосвязь коэффициента стабильности при формировании единичной дорожки молибдена от значений удельной энергии ЛИ, вводимого в порошковый слой. Глубина и ширина единичной дорожки увеличивалась при всех рассмотренных скоростях сканирования при увеличении мощности ЛИ.

Влияние конвективных потоков, вызванных температурными градиентами и силами давления отдачи паров на формирование валика единичной дорожки из молибденового сплава. Скорости потока в ванне достигали значений до 7.4 м/с, векторы скорости которых направлены вне ванны расплава и характеризуют выплески расплавленного материала. Основное влияние на скорость потока расплава в ванне оказывают силы поверхностного натяжения, вязкость расплава и градиент температуры.

Наличие крупных частиц порошка на пути лазерного луча приводит к включению в ванну расплава дополнительного расплавленного материала, вызывая увеличение объема расплавленного материала в ванне и соответственно к увеличению геометрических размеров дорожки в локальных участках, увеличивая нестабильность дорожки. Наличие проплешин или мелких частиц порошка на пути луча наоборот приводит к уменьшению геометрических размеров единичной дорожки. Поэтому частицы порошка должны иметь достаточно узкий гранулометрический состав 15 – 40 мкм.

Применение дополнительного подогрева позволяет уменьшить необходимую плотность мощности для получения оптимальной глубины проплавления единичной дорожки, оказывает низкое влияние на конечную ширину дорожки. Также дополнительный подогрев снижает скорость охлаждения ванны расплава, что может снизить уровень остаточных напряжений в слое и, как следствие, во всей выращиваемой детали. В то же время, уменьшение скорости охлаждения приведет к укрупнению микроструктуры.

При многодорожковом сканировании первая отсканированная единичная дорожка претерпевает температурные колебания, вызванные прохождением лазерного луча при сканировании соседних дорожек (Рисунок 3). Температура зависит от расстояния штриховки и ширины единичной дорожки, и может достигать значений выше температуры плавления при сканировании соседней дорожки. Сканирование последующий дорожек и соответственно удаление лазерного луча от первой дорожки, приводит к уменьшению температурных колебаний. Их наличие может вызвать укрупнение микроструктуры, что негативно скажется на конечных механических свойствах.

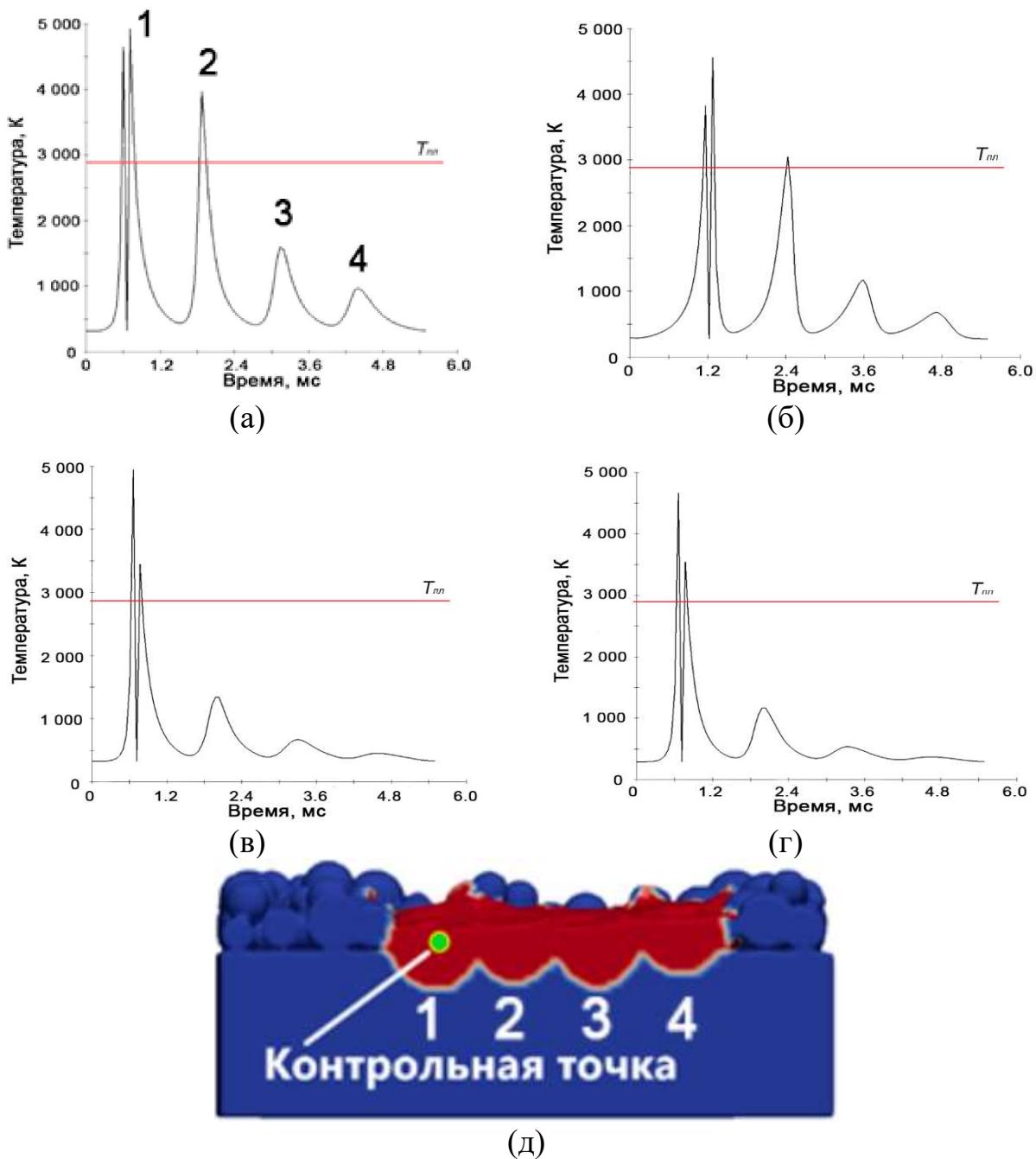


Рисунок 3. Поведение температурного поля в контрольной точке при многодорожковом сканировании и расстояниях между дорожками: а – 40 мкм, б – 60 мкм, в – 80 мкм, г – 100 мкм.

Для параметров моделирования оптимальным расстоянием штриховки является 80 мкм, позволив получить слой с наименьшим перекрытием дорожек и отсутствием не сплавленных частиц порошка между ними. Установлены эволюция температурного поля, конвекция ванны расплава и термические циклы при многодорожковом сканировании в процессе СЛП.

В Главе 4 представлены результаты экспериментальных исследований, а также проведено сопоставление с расчетными данными для оценки достоверности численного анализа. Проведены исследования пористости, микроструктуры и

механических свойств и определен оптимальный режим выращивания методом СЛП. На основе разработанных режимов технологии выращивания на отечественном комплексе СЛП-250 изготовлены многочисленные образцы для проведения испытаний и изделие из молибденового жаропрочного сплава ЛМ-2.

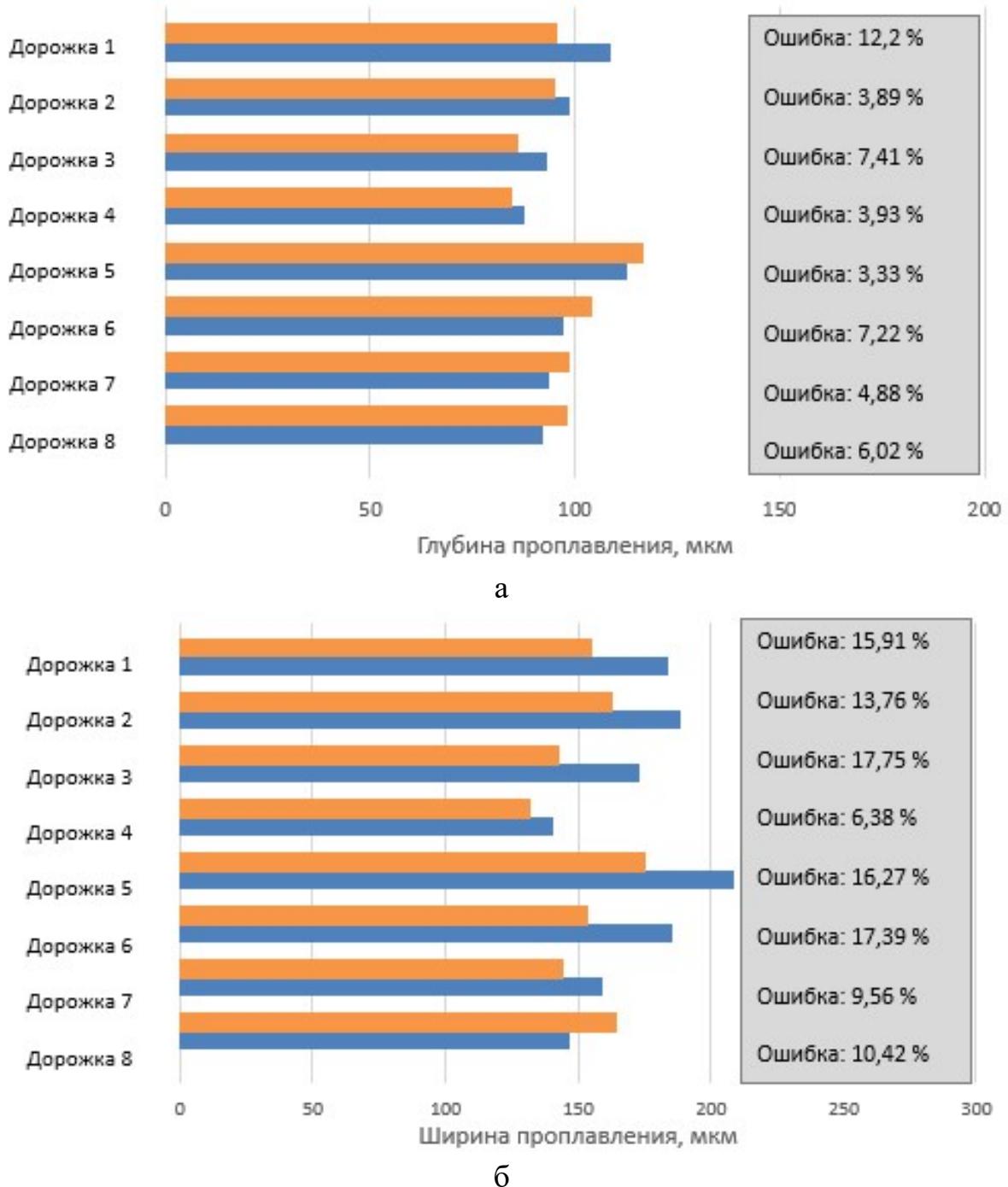


Рисунок. 4. Диаграммы сравнения результатов эксперимента и численного моделирования: а – сравнение глубины проплавления, б – сравнение ширины проплавления (Синим показаны данные полученные при проведении эксперимента, оранжевым результаты численной модели).

Проведенная серия экспериментов по СЛП единичных дорожек из молибденового сплава показала высокое соответствие результатов моделирования с экспериментом. Поперечные сечения единичных дорожек, полученных при помощи эксперимента, были сравнены с результатами численного моделирования. Сопоставление результатов показало высокую достоверность численной модели в прогнозировании ширины, глубины и формы единичной дорожки СЛП молибдена (Рисунок 4). Ошибка при сравнении глубины дорожек составила в среднем 6.11%, а по ширине порядка 15 %. Увеличение ошибки при сравнении результатов по ширине единичных дорожек связано с тем, что в модели не учитывается Втягивание частиц порошка в расплав из-за возникающей разницы давлений в ванне и их выброс из нее силами давления отдачи.

Режимы, на которых были получены стабильные единичные дорожки были использованы для выращивания объемных образцов и проведения исследований на пористость (Рисунок 5). Наилучший результат по сплошности образцов наблюдался при значениях удельной энергии 379 Дж/мм³ и составил 99,42%.

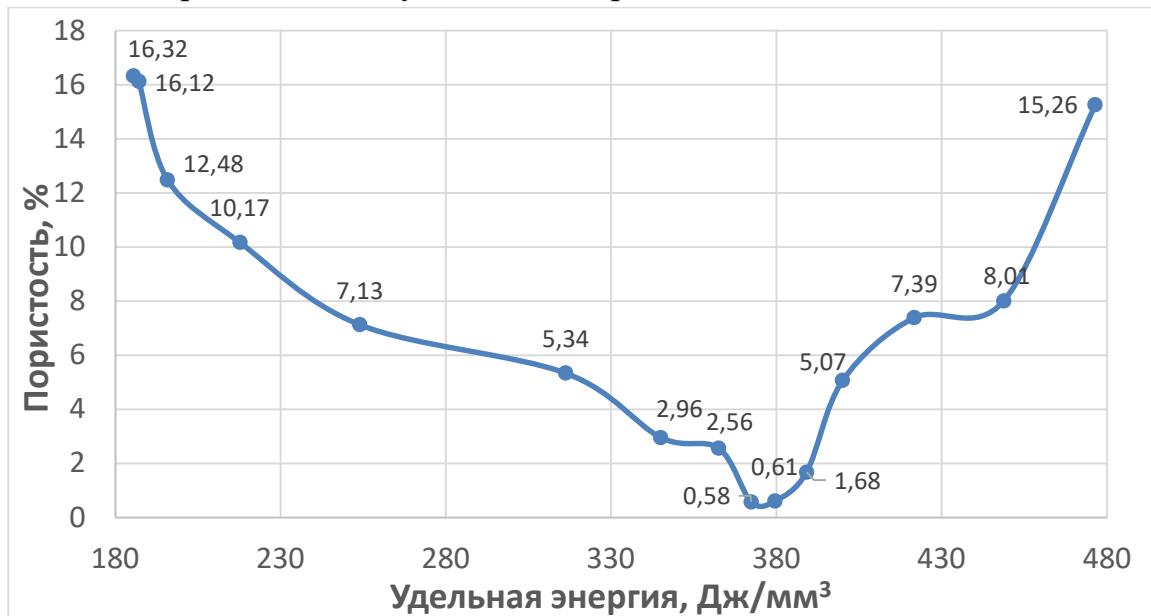


Рисунок 5. Зависимость пористости объемных образцов из молибдена от удельной энергии.

Анализ микроструктуры образцов после СЛП показал наличие удлиненных столбчатых зерен ориентированные вдоль направления выращивания. Максимальная длина некоторых сформированных столбчатых зерен составила 500 – 550 мкм (Рисунок 6). В образцах, полученных с помощью электронно-лучевой и электродуговой плавки, с экструзией при 1600 °С в пруток наблюдались столбчатые зерна, средний размер которых, достигал нескольких миллиметров.

Затем на режимах выращивания с наименьшей пористостью были подготовлены образцы для механических испытаний. На подготовленных образцах была измерена микротвердость, которая составила 350 – 370 HV. Твердость

молибденового сплава после СЛП в 1,5 раза выше, чем у чистового молибдена 160-210 HV и на 30 % больше, чем у аналогичного сплава молибдена, полученного с помощью электронно-лучевой плавки (260 HV). Причина таких высоких значений твердости молибдена после СЛП заключается в измельчении зерна в результате быстрого затвердевания ванны расплава при чрезвычайно высоких скоростях охлаждения.

Предел прочности σ_b в среднем составляет 791 МПа, а относительное удлинение находится в пределах 3 – 3,5 %. Прочность возросла на 22 % по сравнению с молибденовым сплавом, полученным с помощью вакуумной электронно-лучевой и вакуумной электродуговой плавкой 685 МПа. Увеличение прочности образцов молибденового сплава, выращенных методом СЛП, согласуется с уменьшением среднего размера зерна с нескольких миллиметров до 500 мкм.

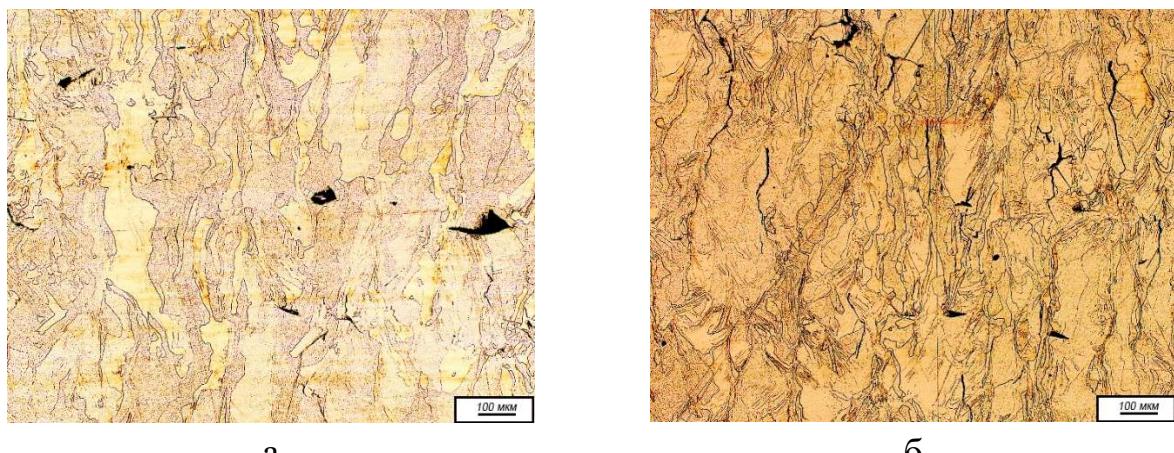


Рисунок 6. Микроструктура образцов из молибденового сплава, полученных методом СЛП (Направление построения по оси Z). а, б – после травления.

Изделие, на котором происходила апробация разработанной технологии представляет собой устройство для перемешивания стекломассы (Elmet Technologies). Выбор молибденового сплава обусловлен высоким механическим свойствами при высоких температурах (температура стекломассы в процессе гомогенизации достигает 1 700 °C), высокой тепло-электропроводности и его не окрашивающим свойством при повышенных температурах. Исходная геометрия устройства перемешивания была переработана, чтобы изготовить единую, цельнометаллическую деталь.

Рассмотрено влияние расположения детали в зоне построения на время выращивания, количество необходимого материала, рентабельность, а также значения деформации и остаточных напряжений, определенные с помощью термомеханического моделирования. Термомеханическое моделирование проводилось с использованием программного обеспечения Netfabb. Оптимальным

вариантом оказалось выращивание устройства без использования подпорок, непосредственно от подложки выращивания. Такое расположение требовало значительно меньшего объема порошка и затрат на время выращивания (время выращивания ~ 4 часа) и обеспечило наименьшие значения деформации в процессе выращивания.

На основе разработанных режимов технологии выращивания на отечественном комплексе СЛП-250 изготовлено изделие, представленное на Рисунке 7 из молибденового сплава ЛМ-2.

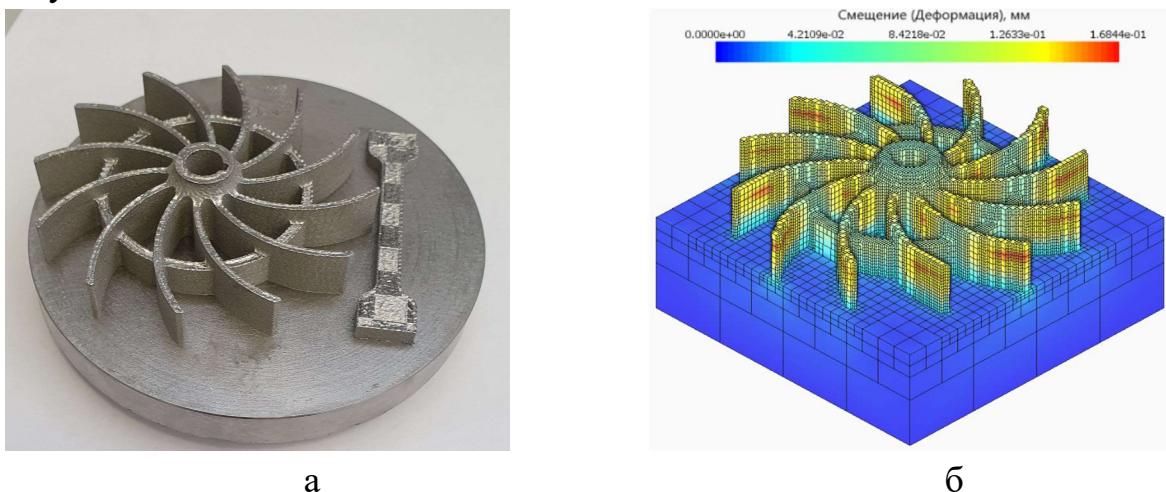


Рисунок 7. а – выращенная методом СЛП деталь из молибденового сплава ЛМ-2 без использования поддержек от подложки выращивания; б – результат термомеханического моделирования

Основные выводы по работе

В ходе выполнения работы были решены следующие задачи:

1. Определено влияние технологических параметров СЛП на поведение жидкой ванны и стабильность формирования единичной дорожки. Построена зависимость коэффициента нестабильности от удельной энергии. Значения удельной энергии ниже 180 Дж/мм³ и выше 250 Дж/мм³ приводят к нестабильному формированию дорожки.
2. Разработана численная модель процесса СЛП в микромасштабе для описания процессов, происходящих в ванне расплава. Описано поведение конвективных потоков ванны расплава и их влияние на стабильность формирования единичной дорожки. С ростом вводимой удельной энергии выше 250 Дж/мм³ максимальная скорость потока ванны расплава возрастила и составила 7.4 м/с, что приводило к росту коэффициента нестабильности выше установленного критерия $R_{\text{нестаб}} = 0.05$.
3. С использованием результатов численного моделирования определены диапазоны оптимальных режимов выращивания для формирования

стабильных единичных дорожек. Значения удельной энергии 180 – 250 Дж/мм³ позволяет сформировать единичные дорожки без пор и несплавлений из молибденового жаропрочного сплава.

4. Достоверность численной модели подтверждена экспериментально по результатам сравнения геометрии смоделированных единичных дорожек и единичных дорожек, полученных экспериментально. Ошибка при сравнении глубины дорожек составила в среднем 6.11%, а по ширине порядка 15 %.
5. Окончательно определены режимы СЛП сплава ЛМ-2 из диапазона, полученного в результате моделирования, путём выращивания объемных образцов для металлографических исследований структуры и пористости. Значение удельной энергии 330 – 380 Дж/мм³ и скорости сканирования 400 – 600 мм/с при высоте слоя 30 мкм и шаге штриховки 80 мкм позволило достичь минимальных значений пористости объемного образца менее 1%.
6. Разработана технология выращивания методом СЛП из жаропрочного молибденового сплава на основе результатов численного моделирования и экспериментальных данных. Разработанная технология обеспечивает предел прочности на уровне σ_в = 827 МПа, микротвердость на уровне 370 HV, шероховатость на уровне Ra = 10.4 и точность линейных размеров на уровне + - 50 мкм.

В итоге добавление молибденового сплава ЛМ-2 в номенклатуру материалов СЛП позволит значительно расширить области его применения. Возможность изготовления изделий без сварных и резьбовых соединений, в цельнометаллическом исполнении. Обеспечит значительное повышение производительности и прочности.

Список трудов

1. Денежкин А.О., Дренин А.А., Симонов А.П. Особенности формирования микроструктуры в изделиях, полученных по технологии селективного лазерного плавления из медных сплавов. Политехнический молодежный журнал № 11, 2019, С. 1 - 7. (0.8 п. л./0.4 п. л.).
2. Исследование влияния режимов выращивания методом селективного лазерного плавления на пористость в изделиях из медных сплавов., /А. О. Денежкин [и др.], «ФОТОНИКА», 2019, Т. 13, №2, С. 160 - 171. (1.27 п. л./ 0.7 п. л.).
3. Влияние основных параметров на стабильность формирования единичных дорожек при селективном лазерном плавлении медных сплавов., / А. О. Денежкин [и др.], «Известия высших учебных заведений. Машиностроение», 2019, №6, С. 20 - 26. (0.7 п. л. / 0.37 п. л.).

4. Денежкин А. О., Колчанов Д. С., Дренин А. А. Особенности выращивания изделий из медных сплавов методом селективного лазерного плавления // Аддитивные технологии в цифровом производстве. Металлы, сплавы, композиты. 2019. №1, С. 44. (0.86 п. л./0.34 п. л.).
5. Исследование механических свойств образцов из медного жаропрочного сплава БрХ0,8, полученных методом селективного лазерного плавления., / А. О. Денежкин [и др.], // Журнал «Цветные металлы». 2021. №4 (940). С. 66-70. (0.46 п. л./ 0.2 п.л.).
6. Исследование влияния основных параметров процесса СЛП на пористость образцов из алюминиевого сплава RS-300., / А. О. Денежкин [и др.], «Известия высших учебных заведений. Машиностроение», 2022, №8, С. 55 - 62. (0.8 п. л./0.4 п. л.).
7. Особенности процесса селективного лазерного плавления из конструкционной стали 28Х3СНМВФА., / А. О. Денежкин [и др.], «Известия высших учебных заведений. Машиностроение», 2022, №10, С. 79 - 86. (0,8 п. л./ 0.4 п. л.).
8. Денежкин А.О., Бинков И. И., «Механические свойства образцов из алюминиевого порошка АСП–30 изготовленные методом селективного лазерного плавления» // Журнал «Цветные металлы». 2022. №4 (940). С. 66-70. (0,46 п. л./0.3 п. л.).
9. Денежкин А. О. Краткий обзор состояния селективного лазерного плавления тугоплавких металлов. Четырнадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 21–24 сентября 2021 г.): сборник докладов : в 2 Т. / Союз машиностроителей России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, С. 310 - 319. (1.04 п.л.).