

БАЛЯКИН АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ГТД  
МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ**

2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели  
и энергоустановки летательных аппаратов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре технологий производства двигателей.

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент  
**Хаймович Александр Исаакович**

**Официальные оппоненты:**

**Колодяжный Дмитрий Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», проректор по научной деятельности;

**Ионов Алексей Владимирович**, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», доцент кафедры «Технология производства двигателей летательных аппаратов».

**Ведущая организация:**

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 16 мая 2025 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.10, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте: [https://ssau.ru/resources/dis\\_protection/baliakinav](https://ssau.ru/resources/dis_protection/baliakinav).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2025 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.379.10  
доктор технических наук, доцент

А.С. Виноградов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** С учётом того, что современные газотурбинные двигатели (ГТД) должны соответствовать растущим требованиям по улучшению тягово-экономических характеристик, повышению надёжности и эффективности, уменьшению веса при ограничении по стоимости, возникает необходимость в разработке новых конструкций компонентов и узлов, а также в применении современных высокопроизводительных технологий, обеспечивающих снижение трудоёмкости их изготовления. Одной из таких технологий является прямое лазерное выращивание (ПЛВ), которое обеспечивает высокий коэффициент использования материала и позволяет получать заготовки с минимальным припуском на последующую обработку. Например, в условиях традиционного производства время, затраченное на изготовление кожуха камеры сгорания ГТД, состоящего из четырёх отдельных кольцевых заготовок, составляет 2–3 месяца, а технологический процесс (ТП) содержит порядка 200 операций. Применение технологии ПЛВ при производстве кожухов камер сгорания ГТД за счёт достоинств, указанных ранее, позволит сократить время их изготовления в 2 раза. Разработка ТП изготовления заготовок сложнопрофильных деталей методом ПЛВ является сложной, комплексной и многовариантной задачей, требующей учёта большого числа разнообразных факторов для последующего выбора рациональных условий их изготовления на основе математического моделирования взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции.

Исходя из вышеизложенного, применение технологии ПЛВ для изготовления крупногабаритных заготовок деталей камер сгорания ГТД является экономически выгодным направлением совершенствования ТП, что позволит значительно повысить эффективность производства ГТД при наличии соответствующей методики. Поэтому тема диссертации, направленная на разработку методики проектирования ТП изготовления крупногабаритных заготовок деталей камер сгорания ГТД методом ПЛВ, является актуальной. Данное исследование в полной мере соответствует приоритетным направлениям стратегии научно-технологического развития Российской Федерации до 2035 года и стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года.

**Степень разработанности темы.** Вопросами разработки и применения технологических процессов аддитивного производства при изготовлении деталей различных изделий, занимались многие отечественные и зарубежные учёные, такие как Г.А. Туричин, О.Г. Оспенникова, В.Г. Смелов, Ю.А. Ножницкий, Л.А. Магеррамова, Д.Н. Трушников, Д.Ю. Колодяжный, Е.В. Земляков, К.Д. Бабкин, А.В. Сотов, А.М. Вильданов, В.В. Исаков, И.С. Мазалов, О.М. Огородникова, А.В. Рипецкий, В.Г. Низьев, О.П. Решетникова, А.Г. Аксенов, Р.М. Bhatt, P. Gradl, T. Schopphoven, Y.J. Yoon, R. Kovacevic, A.T. Anderson, G. Backes, R.K. Malhan, A. Cervone, S.K. Gupta, P. Colonna, A. Rubenchik и другие. К сожалению, в работах данных авторов не уделено должного внимания процессу ПЛВ крупногабаритных заготовок тонкостенных деталей из жаропрочных и жаростойких материалов.

Как известно, на протекание процессов лазерного выращивания, осуществляемых различными аддитивными методами, определяющее влияние оказывают технологические параметры, такие как мощность лазерного излучения, расход МПК и т.д. Поиск рациональных значений данных параметров при различных условиях выращивания занимались А.И. Логачёва, В.Я. Беленький, А.А. Попович, В.Ш. Суфияров, А.Г. Григорьянц, И.А. Ядроитцев, Н.С. Баранова, И.Ю. Смуров, В.Н. Петровский, А.А. Холопов, Р. А. Латыпов, И. А. Логачёв, А.М. Хакимов, А.В. Осинцев, П.С. Джумаев, П.А. Кузнецов, С. M.L. Dezaki, A. Serjouei, A. Zolfagharian, D. Gu, D. Dai, M. Alkhayat, G. Piscoro, L. Iuliano и другие. Однако лишь в некоторых работах указанных авторов рассматриваются вопросы, связанные с определением рациональных технологических параметров при выращивании заготовок из жаропрочных материалов. А это имеет очень важное значение, например, для технологических процессов изготовления заготовок деталей авиационных ГТД.

Определение рациональных технологических параметров процессов лазерного выращивания, как правило, осуществляется на основе математических моделей. Разработкой моделей взаимодействия лазерного излучения и МПК занимались О.Б. Ковалёв, А.Ф. Ильющенко, А.С. Борейшо, А.В. Савин, В.И. Богданович, М.Г. Гиорбелидзе, A.J. Pinkerton, I. Tabernerо, A. Lamikiz, S. Martínez, D. Eisenbarth, E. Ukar, F. Wirth, S. Freihse, K. Wegener, W. Devesse, D. De Baere, P. Guillaume, Y.L. Huang, G.Y. Liang, J.Y. Su, T. Ozel, V. Shankar, S.A. Khairallah и другие. При этом важно обеспечить эффективную величину значения фокусного расстояния в зависимости от

технологических параметров выращивания. К сожалению, такой аналитической модели, позволяющей определить эту величину, для различных условий ПЛВ в литературе не обнаружено.

Следует отметить, что хотя исследованиями в области влияния фокусировки лазерного излучения на рельеф получаемой поверхности занимался целый ряд ученых, в том числе С.П. Мурзин, Н.Л. Казанский, И.В. Шишковский, А. Paraschiv, G. Matache, M.R. Condruz, J. Chen, S. Sui, T.F. Frigioescu, Lv. Chunchi, J. Wang, H. Li, Q. Yin, W. Liu, S. Shen, H. Tan, C. Zhong, Z. Li, X. Ming, S. Zhang и другие, этот вопрос требует более глубокой проработки, а именно в части влияния изменения лазерной фокусировки на стабильность процесса ПЛВ и качество выращенного материала.

**Цель работы:** повышение производительности изготовления крупногабаритных деталей авиационных ГТД с использованием технологического процесса изготовления заготовок методом прямого лазерного выращивания на основе разработки методики, обеспечивающей получение требуемых характеристик заготовки за счёт определения рациональных условий прямого лазерного выращивания.

**Задачи исследования:**

1. Разработать аналитическую математическую модель плавления металлопорошковой композиции под воздействием лазерного излучения в процессе прямого лазерного выращивания, посредством программы РТС Mathcad выполнить численное исследование влияния параметров формообразования заготовки на расстояние до зоны расплавления для определения эффективной величины фокусного расстояния.

2. Исследовать влияние основных технологических параметров выращивания (мощности лазерного излучения, скорости выращивания, расхода металлопорошковой композиции) на формирование геометрии, предел прочности, структуру и трещинообразование наплавляемого жаропрочного сплава ЭП648. С использованием регрессионного анализа определить рациональные технологические параметры выращивания с учётом результатов аналитического моделирования.

3. Исследовать влияние расфокусировки лазерного излучения на рельеф поверхности, отклонение геометрии и стабильность процесса плавления. Создать базу данных влияния условий прямого лазерного выращивания на геометрические размеры и микроструктуру образцов из сплава ЭП648, необходимую для проектирования технологического процесса изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД.

4. Разработать методику проектирования технологического процесса для изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД из жаропрочного сплава ЭП648.

5. Разработать технологический процесс ПЛВ крупногабаритных заготовок из жаропрочных сплавов на основе использования полученных рациональных технологических режимов сплавления и проверить его работоспособность при изготовлении крупногабаритных заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» из жаропрочного сплава ЭП648 для ГТД семейства «НК». Подтвердить заявленные характеристики стендовыми испытаниями.

**Объект исследований.** Технологические процессы производства крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД из жаропрочных сплавов.

**Предмет исследований.** Крупногабаритные заготовки для деталей камер сгорания ГТД из жаропрочного сплава ЭП648.

**Научная новизна работы:**

1. Разработана аналитическая математическая модель взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции для процесса прямого лазерного выращивания, позволяющая установить зависимости между параметрами формообразования (скорости газопорошковой струи, насыпной плотности, среднего радиуса частиц металлопорошковой композиции и мощности лазера), отличающаяся от известных решений учётом полноты плавления металлопорошковой композиции вне зоны ванны расплава.

2. На основе разработанной и экспериментально верифицированной математической модели выполнен численный эксперимент, полученные результаты позволяют уточнить границы рациональной области технологических режимов прямого лазерного выращивания (мощности лазерного излучения, скорости выращивания, расхода металлопорошковой композиции) для последующего поиска рациональных значений методом регрессионного анализа.

3. Методом регрессионного анализа определено рациональное значение мощности лазерного излучения при сплавлении металлопорошковой композиции жаропрочного сплава ЭП648 на основе данных натурального эксперимента по определению механических характеристик (предел прочности, относительное удлинение и твёрдости) в состоянии до и после термообработки. В отличие от известных решений принятый подход позволил уменьшить область многокритериального поиска до одного фактора – мощности лазерного излучения с учётом результатов теоретического моделирования и базы знаний по рациональным значениям остальных технологических параметров: высота слоя, шаг наплавки, скорость наплавки.

4. Установлены закономерности влияния величины расфокусировки лазера на геометрическую точность и параметры рельефа поверхностей заготовок. В отличие от известных решений

были предложены новые параметры оценки характерных изменений рельефа заготовок: отклонение и нестабильность высоты наплавки для верхней торцевой поверхности и максимальная высота – для боковых стенок заготовки.

5. Разработана методика проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД прямым лазерным выращиванием, включающая аналитическую модель взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции, регрессионные зависимости и базу знаний для определения рациональных значений технологических параметров, метод повышения геометрической точности заготовки путем численного моделирования процесса в САЕ-системе.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке новой математической модели взаимодействия лазерного излучения и МПК для процесса ПЛВ, учитывающей пространственно-энергетические параметры в зоне выращивания; в получении регрессионных зависимостей влияния мощности лазерного излучения на прочностные характеристики наплавляемого материала; в предложении параметров для оценки качества рельефа верхней поверхности и боковых стенок заготовок.

**Практическая значимость результатов работы** заключается в разработке методики проектирования ТП ПЛВ крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД, включающей алгоритм проектирования, определение рациональных технологических параметров, обеспечивающих снижение трудоёмкости, увеличение производительности и повышение качества изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД; в установлении влияния технологических режимов термической обработки на анизотропию свойств, микроструктуру и механические свойства сплава ЭП648; в разработке рекомендаций по проектированию элементов конструкций заготовок, изготавливаемых технологией ПЛВ; в разработке и реализации ТП изготовления крупногабаритных заготовок деталей «Кожух наружной камеры сгорания» и «Кожух внутренней камеры сгорания» ГТД по технологии ПЛВ из отечественной МПК – жаропрочного никелевого сплава ЭП648.

**Содержание диссертации соответствует** пункту 9 «Теоретические основы и технологические процессы изготовления деталей двигателей и агрегатов летательных аппаратов, включая технологическую подготовку производства, в том числе автоматизированные системы проектирования и управления, технологические процессы и специальное оборудование для формообразования и обработки деталей двигателей, их защита» паспорта специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

**Методы исследований.** Достижение поставленной цели и решение задач диссертационной работы осуществлялись с использованием аналитических методов теории теплопроводности, плавления и кристаллизации твёрдых тел, а также методов численного моделирования с использованием программного продукта для математических вычислений PTC MathCAD.

Натурные эксперименты проводились на современном сертифицированном оборудовании с использованием стандартных методик и поверенных средств измерений. Обработка результатов экспериментальных исследований осуществлялась с применением методов математической статистики. Стендовые испытания крупногабаритных деталей «Кожух наружной камеры сгорания» и «Кожух внутренней камеры сгорания» из жаропрочного сплава ЭП648, заготовки для которых изготовлены методом ПЛВ, были проведены на стенде ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара) в составе технологического ГТД, обеспечивающего реальные условия эксплуатации.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Математическая модель взаимодействия лазерного излучения и МПК для процесса ПЛВ, учитывающая пространственно-энергетические параметры процесса и позволяющая определить положение зоны полного расплава МПК, т.е. расстояние от точки начала взаимодействия лазерного луча с МПК до точки её полного расплавления.

2. Установленные зависимости, полученные на основе численного эксперимента влияния скорости газопорошковой струи, насыпной плотности, среднего радиуса частиц металлопорошковой композиции и мощности лазера на положение зоны полного расплава МПК, т.е. расстояние от точки начала взаимодействия лазерного луча с МПК до точки её полного расплавления.

3. Регрессионные зависимости влияния мощности лазерного излучения на прочностные характеристики (предел прочности, относительное удлинение и твердость) жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648 до и после термообработки.

4. Зависимости влияния технологических режимов термической обработки жаропрочного никелевого сплава ЭП648 на анизотропию свойств, микроструктуру и механические свойства.

5. Установленные зависимости влияния величины расфокусировки лазера на параметры рельефа верхней и боковых поверхностей заготовок и геометрическую точность получаемых размеров.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** и выводов обеспечиваются корректностью физической и математической постановки задач исследования, применением апробированных аналитических и численных методов расчёта и анализа, обоснованностью принятых

допущений и ограничений в математической модели, хорошей сходимостью расчётных и экспериментальных данных, положительным эффектом от использования результатов работы в производстве при изготовлении деталей ГТД.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты работы доложены на: Международной научно-технической конференции по достижениям в области прикладной физики и математики – ААРМ-2023 (Узбекистан, г. Ташкент, апрель 2023 г.); International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2023) (Воронеж, апрель 2023 г.); III International Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education – ASEDU-III 2022 (г. Красноярск, октябрь 2022 г.); Международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» (Самара, июнь 2023 г.); X международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, апрель 2024 г.); XI международной научно-технической конференции «Лучевые технологии и применение лазеров» (г. Санкт–Петербург, сентябрь 2024 г.).

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы в виде методики и технологического процесса изготовления крупногабаритных заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД, технологические процессы их изготовления внедрены на ПАО «ОДК-Кузнецов», что подтверждается актом внедрения от 04.02.2025 г., и актом внедрения результатов диссертации на АО «Самарские авиадвигатели» от 04.02.2025 г. Материалы диссертационной работы нашли применение в учебном процессе Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (акт внедрения от 05.02.2025 г.).

**Связь с государственными программами и НИР.** Результаты исследований нашли практическое применение при реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме: «Организация высокотехнологичного производства промышленных ГТД с интеллектуальной системой конструкторско-технологической подготовки для повышения функциональных характеристик» по договору между Самарским университетом и ПАО «ОДК-Кузнецов» от 24 апреля 2021 г. № 00826, ИГК 000000S407521QLG0002 в рамках выполнения Соглашения с Минобрнауки РФ от 24 июня 2021 г. №075-11-2021-042. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSS-2024-0018).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 25 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях, входящих в Перечень, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 4 – в изданиях, индексируемых в базе Scopus. Получено свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024620533 и патенты на изобретение № 2830597 С1, № 2832100 С1 и № 2824784 С2.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 183 наименований и трёх приложений. Общий объём диссертации составляет 239 страниц, содержит 89 рисунков и 46 таблицы.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, степень её разработанности, приведены цель работы и задачи для её достижения, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Представлены основные положения, выносимые на защиту, а также апробация результатов исследований, публикации по теме диссертации.

**В первой главе** представлен анализ современного состояния теории и технологии применения аддитивных процессов изготовления заготовок деталей авиационных ГТД. Проанализированы основные требования, предъявляемые к технологиям изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД, используемые материалы и способы получения заготовок, а также основные операции традиционного ТП изготовления деталей камер сгорания ГТД представленные в работах авторов А.М. Сулим, М.И. Евстигнеева, И.А. Морозова, А.В. Подзея, В.В. Крымова, Ю.С. Елисеева, Е.Н. Семёнова, Б.П. Саушкина, В.А. Костышева, И.Л. Шитарева, Ю.И. Цыбизова, А.А. Носкова, Г.З. Серебренникова.

Выполнен анализ публикаций, посвящённых разработке моделей взаимодействия лазерного излучения и МПК. Показано, что для синтеза высококачественного материала заготовки необходимо полное расплавление МПК, обеспечиваемое рациональными параметрами подвода энергии и материала. Проанализированы найденные в литературе результаты исследования влияния величины расфокусировки лазера на параметры рельефа верхней и боковых поверхностей заготовок и геометрическую точность получаемых размеров. Проведён анализ публикаций, посвящённых разработке ТП изготовления заготовок деталей ГТД с использованием технологии ПЛВ. На основании проведённого обзора публикаций сформулированы задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели взаимодействия лазерного излучения и МПК в процессе ПЛВ, а также численному моделированию и выбору диапазона рациональных технологических параметров процесса ПЛВ на основе статистической обработки данных численного эксперимента.

Представлены описание процесса ПЛВ и постановка задачи моделирования. Установлено, что механические свойства полученного материала будут определяться полнотой расплавления частиц МПК. Так как МПК подается в зону лазерного излучения коаксиально, то по мере движения её частиц наблюдается, с одной стороны, поглощение ими лазерной энергии, а, с другой стороны, ослабевание энергии лазерного луча в связи с прохождением через газопорошковую струю. Таким образом, для разработки технологического режима, обеспечивающего возможность расплавления частиц МПК, необходимо определить границы параметров режима, при которых происходит полное расплавление каждой частицы МПК в газопорошковой струе и образование ванны расплава на поверхности заготовки. Допущения, используемые при моделировании: все лазерные лучи параллельны, т.е. лазерное излучение, имеет постоянное сечение и интенсивность лазерного излучения постоянно в пределах сечения. Кроме того, предполагается, что вся газопорошковая смесь поступает в область наплавки в пределах сечения лазерного излучения. Частицы МПК имеют сферическую форму со средним диаметром 200 мкм.

Как видно из рисунка 1, тепловой поток от лазерного излучения проходит через столб газопорошковой струи. При этом нагрев частиц, движущихся со скоростью  $v = 3,5$  м/с, осуществляется через верхнюю полусферу потоком лазерного излучения мощностью  $Q_{\text{лазер}} = 2000$  Вт. В этом случае его изменение для диска толщиной  $dx$  может быть рассчитано с помощью баланса энергии лазерного излучения:

$$Q_{\text{лазер}}(x+dx) = Q_{\text{лазер}}(x) - N dx A_p k_l Q_{\text{лазер}}(x), \quad (1)$$

где  $N$  – насыпная плотность МПК,  $A_p$  – проекционная площадь сферического порошка,  $k_l$  – коэффициент поглощения лазерного излучения материала МПК,  $Q_{\text{лазер}}(x)$  – тепловой поток лазерного излучения в точке  $x$ , т.е. точке, положение которой соответствует расстоянию до неё от точки начала взаимодействия лазерного луча с МПК. Из (1) можно получить дифференциальное уравнение для бесконечно малых значений  $dx$ :

$$\frac{dQ_{\text{лазер}}}{dx} = -NA_p k_l Q_{\text{лазер}}(x), \quad (2)$$

решением которого является зависимость, известная как закон Бера-Ламберта:

$$Q_{\text{лазер}}(x) = Q_{\text{лазер}}(0) \text{Exp}[-NA_p k_l x]. \quad (3)$$

Число Био для МПК меньше 0,1, поэтому изменения температуры внутри частиц МПК очень малы. Следовательно, теплообмен можно смоделировать методом сосредоточенных параметров. Для сферического порошка  $V = \frac{4}{3}\pi r^3$  и  $A = 4\pi r^2$ , где  $r$  – радиус частицы порошка (мкм), интеграл от теплового потока лазерного излучения примет вид  $k_l \pi r^2 Q_{\text{лазер}}$ :

$$\rho v_p \frac{r_{cp}}{3} \frac{dH}{dx} = \frac{1}{4} k_l \cdot Q_{\text{лазер}}(x) - h(T - T_{зг}) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_{окр}^4) \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность материала МПК,  $r_{cp}$  – средний радиус частиц МПК,  $h$  – коэффициент теплопередачи от частичек МПК,  $v_p$  – скорости движения МПК,  $H$  – энтальпия,  $T$  – температура МПК,  $T_{зг}$  – температура защитного газа,  $\varepsilon$  – коэффициент излучения,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $T_{окр}$  – температура окружающей среды.

Уравнение (4) представляет собой энергетический баланс порошка при его падении на платформу построения. В этом уравнении имеются две зависимые переменные – энтальпия  $H$  и температура  $T$ . Для решения уравнения (4) выразим энтальпию через температуру.

$$H - H_3 = \begin{cases} C_{тв}(T - T_3), & T < T_{пл}, \\ \lambda_{пл} + C_{тв}(T_{пл} - T_3), & T = T_{пл}, \\ C_{ж}(T - T_{пл}) + C_{тв}(T_{пл} - T_3) + \lambda_{пл}, & T > T_{пл}, \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{где } H_{пл} = C_{тв}(T_{пл} - T_3) + H_3, \quad (6)$$

Здесь  $H_3$  – эталонная энтальпия;  $H_{пл}$  – энтальпия плавления;  $T_3$  – эталонная температура;  $T_{пл}$  – температура плавления;  $C_{тв}$  – теплоёмкость твердого тела;  $C_{ж}$  – теплоёмкость жидкого расплава;  $\lambda_{пл}$  – теплота плавления удельная.

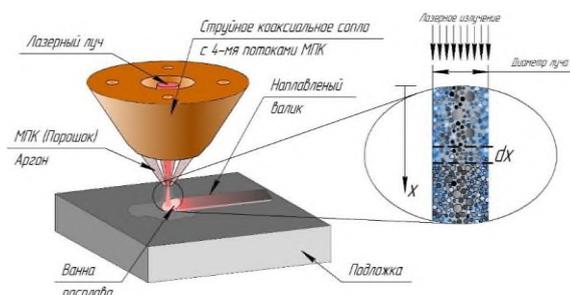


Рисунок 1 – Схема взаимодействия лазерного излучения с МПК

В итоге уравнение (4) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка с начальным условием на поверхности частицы МПК:

$$T = \frac{T_i \cdot a \cdot t}{x^2} = 0, \quad (7)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $t$  – время. Тогда начальная энтальпия может быть найдена с помощью уравнения (5).

Математическая модель, описываемая уравнениями (3)–(7), может быть решена численно с использованием метода Эйлера. Конечно-разностная форма уравнения (4) имеет вид:

$$H_n = H_{n-1} + \frac{3\Delta x}{\rho C_p v_p r_{cp}} \times \left( \frac{k_l}{4} Q_{\text{лазер}}(x_{n-1}) - h(T_{n-1} - T_{\text{зг}}) - \varepsilon \sigma (T_{n-1}^4 - T_{\text{окр.}}^4) \right). \quad (8)$$

Подстрочные индексы « $n-1$ » и « $n$ » обозначают, соответственно, текущий и следующий временные шаги. Численный и аналитический методы решения были успешно протестированы и показали хорошую сходимость. При выполнении расчётов величина  $\Delta x = x_n - x_{n-1}$  составляла  $10^{-7}$  м.

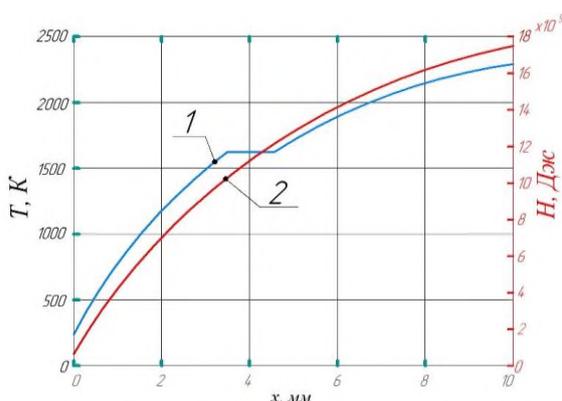


Рисунок 2 – Зависимости температуры (1) и энтальпии МПК (2) от  $x$  при мощности лазера 2000 Вт,  $N = 4,9$  гр/см<sup>3</sup>,  $r_{cp} = 0,1$  мм и  $V_{cmp} = 3,5$  м/с

На рисунке 2 показаны зависимости температуры и энтальпии от расстояния  $x$ . Как и ожидалось, энтальпия порошка неуклонно растёт с увеличением расстояния. Кривая имеет нелинейный характер, что свидетельствует о наличии конвекции излучения. Из зависимости  $T = f(x)$  хорошо прослеживается процесс плавления порошка. Он начинает плавиться при  $x = 3,5$  мм и полностью расплавляется при  $x = 4,51$  мм. После этой точки порошок, как и следовало ожидать, продолжает поглощать лазерную энергию, и его температура увеличивается.

Для процесса ПЛВ наиболее предпочтительным является полное расплавление МПК до его попадания на подложку, причём желательнее с небольшим перегревом. Представленная ранее математическая модель предназначена для определения положения зоны расплава МПК, а значит, и расстояния между соплом и ванной расплава при различных условиях выращивания. Для понимания сути протекающего процесса нагрева и плавления частиц МПК при различных режимах выращивания на основе разработанной модели проведены исследования влияния скорости газопорошковой струи, насыпной плотности МПК, среднего радиуса МПК и мощности лазера на расстояние до зоны расплавления МПК. Результаты численных экспериментов представлены в таблицах 1-4.

Из данных таблицы 1 видно, что с увеличением скорости движения газопорошковой струи увеличивается расстояние до зоны расплавления МПК, что приводит к увеличению ширины валика и, следовательно, уменьшению точности наплавления.

Таблица 1 – Расстояние до зоны расплавления МПК, объёмный расход и ширина валика в зависимости от скорости газопорошковой струи

Скорость газопорошковой струи, м/с	Расстояние до зоны расплавления, мм	Объёмный расход, мм <sup>3</sup> /с	Ширина валика, мм
3,5	2,23	6,25	2,51
4	4,49	12,49	2,63
4,5	7,11	18,74	2,69
5	10,10	24,97	2,71

Таблица 2 – Расстояние до зоны расплавления МПК, объёмный расход и ширина валика в зависимости от мощности лазера

Мощность лазера, Вт	Расстояние до зоны расплавления, мм	Объёмный расход, мм <sup>3</sup> /с	Ширина валика, мм
1600	7,12	12,5	2,5
1800	4,81	12,5	2,5
2000	4,49	12,5	2,5

С увеличением мощности лазера, как следует из анализа данных таблицы 2, расстояние до зоны расплавления уменьшается, а вместе с тем объёмный расход и ширина валика остаются постоянными, т.е. не зависят от мощности лазера.

Таблица 3 – Расстояние до зоны расплавления порошка, объёмный расход и ширина валика в зависимости от насыпной плотности МПК

Насыпная плотность МПК, гр/см <sup>3</sup>	Расстояние до зоны расплавления, мм	Объёмный расход, мм <sup>3</sup> /с	Ширина валика, мм
3,0	4,22	5,01	2,3
4,9	4,49	12,5	2,5
6,0	4,80	19,99	2,7

Из приведённых в таблице 3 данных видно, что с ростом плотности МПК увеличиваются как расстояние до зоны расплавления, так и объёмный расход, и ширина валика.

Данные, представленные в таблице 4, позволяют оценить влияние среднего радиуса частиц МПК на расстояние до зоны расплавления, а также объёмный расход и ширину валика. Из них видно, что с ростом радиуса частиц наблюдается рост всех указанных характеристик.

Таблица 4 – Расстояние до зоны расплавления МПК, объёмный расход и ширина валика в зависимости от среднего радиуса частиц МПК

Средний радиус частиц МПК, мкм	Расстояние до зоны расплавления, мм	Объёмный расход, мм <sup>3</sup> /с	Ширина валика, мм
75	2,78	3,7	2,1
100	4,49	12,5	2,51
125	7,07	29,6	2,71

По результатам численного эксперимента, базирующегося на разработанной математической модели, установлены диапазоны значений технологических параметров процесса ПЛВ, такие как: мощность лазерного излучения – 1800-2000 Вт; расход МПК – 20-31 г/мин; скорость – 20-30 мм/с.

**В третьей главе** приведены результаты исследования физико-механических свойств жаропрочного никелевого сплава ЭП648, полученного технологией ПЛВ. Данные свойства во многом определяются структурно-фазовым состоянием материала. Поэтому перед изготовлением образцов для МПК сплава ЭП648 был выполнен входной контроль на соответствие требованиям, включающий гранулометрический анализ, изучение морфологии поверхности частиц МПК, химический анализ, оценку сыпучести и определение насыпной плотности.

Далее был определён рациональный режим сплавления МПК, обеспечивающий наилучшие параметры качества материала. Для этого на основе использования результатов исследования, полученных в **главе 2**, был разработан план эксперимента. В процессе экспериментальных исследований оценивалось влияние технологических параметров процесса ПЛВ на предел прочности при растяжении и отсутствие дефектов в структуре материала. Для проведения структурных исследований материала, выращенного при значениях мощности от 1200 до 2200 Вт, было изготовлено по 3 образца, а для контроля механических характеристик – по 5 образцов, с продольным и поперечным направлением оси относительно направления выращивания.

Наличие дефектов макро- и микроструктуры в виде пористости, нерасплавленных частиц материала и трещин, оценивалось в образцах до и после термообработки. Исследование проводилось в продольном и поперечном сечениях образцов для всех значениях мощности лазерного излучения. В макроструктуре всех образцов имели место выраженные характерные границы слоёв сплавления. Большинство дефектов представляли собой трещины, непроплавы и поры, т.е. дефекты, являющиеся типичными для технологии ПЛВ.

Анализ микроструктуры показывает, что в образцах после термообработки формируется разнородность, утрачивается слоистая структура, наблюдаются структуры, характерные для упорядоченных твёрдых растворов на основе никеля. Применение мощности лазерного излучения в 2000 Вт приводит к отсутствию дефектов в материале среди всех используемых в данной работе мощностей лазера при проведении эксперимента.

Исходя из результатов исследования механических свойств, следует, что с увеличением мощности лазера значения прочностных характеристик изменяются не монотонно. Минимальные значения имеют место при мощности лазера в 1400 Вт, а наиболее высокие значения достигаются при мощности лазерного излучения в 2000 Вт. При этом во всех образцах наблюдается анизотропия свойств. Проведение термообработки приводит к снижению анизотропии и повышению характеристик в среднем на 10-15 % для образцов, вырезанных в продольном и поперечном направлении относительно направления выращивания, при этом сам характер зависимости значительно не меняется. Необходимые значения временного сопротивления разрыву и предел теку-

чести, установленные нормативной документацией, не достигаются только у образцов, не прошедших термообработку, выращенных при мощности лазера 1400 Вт.

Относительное удлинение после термообработки образцов снижается в среднем на 20-30 % по сравнению с нетермообработанными образцами при всех исследуемых значениях мощности лазера. Аналогичная тенденция имеет место и для относительного сужения образцов всех типов после их термообработки. Проведение термообработки образцов приводит к повышению твёрдости в среднем на 30 % по сравнению с образцами без термообработки, а с увеличением мощности лазера твёрдость материала образцов снижается в среднем на 15 %, тем не менее, её значения больше справочных. Анализ изломов образцов позволил установить, что в образцах, выращенных при значениях мощности лазера в 1200-1800 Вт, в изломах имеются дефекты в виде непроплавов и трещин, а изломах образцов полученных при мощности лазера в 1200 и 1400 Вт – наблюдаются не расплавленные частицы МПК, при мощности лазера в 2000 Вт, в изломах дефекты не наблюдаются, при 2200 Вт имеются дефекты в виде трещин. На поверхностях излома всех образцов присутствовали ямки, а сами поверхности излома имели классическую форму чашечки или конуса, указывающие на вязкий механизм разрушения. Дефекты структуры способствуют зарождению излома, во всех образцах доминирующим механизмом разрушения было слияние дефектов, макро- и микроструктуры.

Выявление статистических связей между зависимыми переменными (откликами) и независимыми переменными было выполнено с помощью коэффициентов ранговой корреляции Спирмена. В продольном направлении наблюдалась большая вариабельность откликов, мало связанных между собой, за исключением предела прочности и твердости. Выраженная выделяемость этих показателей свидетельствовала об упрочнении материала в результате возникновения термических деформаций и как следствие остаточных напряжений, что указывало на необходимость проведения последующей термообработки. В поперечном направлении эффект упрочнения сказывался в меньшей степени из-за характерной направленности пластических деформаций и формирования остаточных напряжений вдоль направления выращивания.

После проведения термообработки корреляционный анализ выявил более устойчивую связь механических параметров (откликов) с независимыми переменными для образцов, вырезанных в продольном направлении. Снижение общей вариабельности и повышение стабильности откликов связано с изменением структурно-фазового состояния материала за счёт проведения термообработки и, как следствие, уменьшения термических остаточных напряжений.

Результаты непараметрического анализа влияния направления выращивания на характер механических свойств у термически не обработанных и обработанных образцов подтвердили выводы корреляционного анализа. Целью проведения регрессионного анализа являлось определение рациональных значений мощности лазерного излучения с точки зрения обеспечения требуемых механических характеристик материала для последующего назначения технологических параметров выращивания. Для определения рациональных значений использовались регрессионные модели третьего порядка. Регрессионные зависимости (модели) влияния мощности лазерного излучения на механические свойства образцов в продольном и поперечном направлениях до и после проведения термообработки приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Регрессионные модели

До проведения термообработки	После проведения термообработки
Регрессионные модели влияния мощности лазерного излучения на предел прочности	
$\sigma_{в.пр} = 886 + 0,339 \cdot P + 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 - 0,95 \cdot 10^{-7} \cdot P^3$	$\sigma_{в.пр} = 799 + 0,191 \cdot P - 0,48 \cdot 10^{-4} \cdot P^2;$
$\sigma_{в.п} = -8091 + 13,7 \cdot P - 6,98 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 + 0,118 \cdot 10^{-5} \cdot P^3;$	$\sigma_{в.п} = -2408 + 3,95 \cdot P - 1,43 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 + 0,152 \cdot 10^{-6} \cdot P^3;$
Регрессионные модели влияния мощности лазерного излучения на относительное удлинение	
$\delta_{пр} = 487 - 0,81 \cdot P + 0,469 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 - 0,89 \cdot 10^{-7} \cdot P^3;$	$\delta_{пр} = -160 + 0,359 \cdot P - 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 + 0,411 \cdot 10^{-7} \cdot P^3;$
$\delta_{п} = 285 - 0,602 \cdot P + 0,415 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 - 0,88 \cdot 10^{-7} \cdot P^3;$	$\delta_{п} = 421 - 0,727 \cdot P + 0,431 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 - 0,83 \cdot 10^{-7} \cdot P^3;$
Регрессионные модели влияния мощности лазерного излучения на твёрдость по Бринеллю	
$HB_{пр} = -4,92 - 0,572 \cdot P - 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 + 0,837 \cdot 10^{-7} \cdot P^3;$	$HB_{пр} = -69,8 + 0,764 \cdot P - 0,51 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 + 0,104 \cdot 10^{-6} \cdot P^3;$
$HB_{п} = -1647 + 3,37 \cdot P + 1,97 \cdot 10^{-2} \cdot P^2 + 0,372 \cdot 10^{-6} \cdot P^3.$	$HB_{п} = -448 + 1,43 \cdot P - 0,89 \cdot 10^{-3} \cdot P^2 + 0,175 \cdot 10^{-6} \cdot P^3.$

Из результатов регрессионного анализа следует, что наилучшие значения механических свойств синтезируемого материала были получены при мощности лазера – 2000 Вт, скорости выращивания – 25 мм/с, расходе МПК – 26,6 г/мин. Проведённые исследования помогли определить рациональные технологические параметры процесса ПЛВ для жаропрочного сплава ЭП648.

В процессе ПЛВ в результате отгибания платформы построения и кинематической неточности движения робота с наплавочной головкой происходит расфокусировка лазерного излучения и газопорошковой струи. Поэтому вторая часть **третьей главы** посвящена изучению влияния лазерной расфокусировки на точность получаемых размеров и качество поверхности. Сформиро-

ванный рельеф поверхностей заготовки имеет ярко выраженные особенности в виде слоёв и колебаний высоты наплавления на верхней части заготовки и налипших выступов на боковых стенках. При многоосевом процессе ПЛВ направление выращивания всегда перпендикулярно поверхности построения. Таким образом, заготовка содержит только два типа контурных поверхностей: верхнюю и боковые. Верхняя поверхность и боковые поверхности имеют различные рельефы, обусловленные механизмами их формообразования. Величина лазерной расфокусировки – это расстояние от поверхности заготовки до фокальной плоскости лазера, она может иметь как положительный, так и отрицательный знак. Знак величины лазерной расфокусировки показывает положение фокальной плоскости лазера относительно поверхности построения или состояние лазерной расфокусировки. Таким образом, величина лазерной расфокусировки, включает в себя две составляющие: числовое значение и состояние расфокусировки, определяемое знаком.

При проведении одновременных экспериментов выращивались образцы с полым квадратным сечением, сторона которых равнялась 50 мм, высота 12 мм и толщина стенки 6 мм. Величина лазерной расфокусировки в каждой серии экспериментов приведена в таблице 6, остальные параметры процесса были фиксированы.

Таблица 6 – Величина лазерной расфокусировки

Номер серии экспериментов	1	2	3	4	5	6
Величина расфокусировки лазера, мм	-1,5	-1,0	-0,5	+0,5	+1,0	+1,5
Расстояние фокусировки, мм	9,0	9,5	10,5	11,5	12,0	12,5



Рисунок 3 – Схема определения параметров рельефа верхней поверхности

Для характеристики рельефа верхней поверхности были предложены показатели: среднее отклонение от заданного размера наплавки и нестабильность высоты наплавки (рисунок 3), расчётные формулы для их определения приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Параметры для характеристики рельефа верхней поверхности образцов

Параметр рельефа поверхности	Формула	Определение
Среднее отклонение от заданного размера наплавки ( $h_{откл}$ )	$h_{откл} = h_a - h_d$	$h_a$ – средняя высота наплавки; $h_d$ – заданный размер заготовки
	$h_a = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n h_i$	$h_i$ – высота наплавки в $i$ -ой точке рельефа верхней поверхности
Нестабильность высоты наплавки или полная высота рельефа верхней поверхности ( $h_{пол. выс}$ )	$h_{пол. выс} = h_{max} - h_{min}$	$h_{max}, h_{min}$ – максимальная и минимальная высота рельефа верхней поверхности

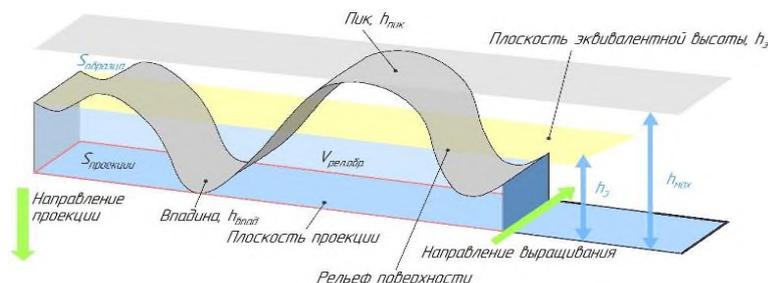


Рисунок 4 – Схема определения параметров поверхности боковых стенок

Для характеристики рельефа поверхностей боковых стенок было предложено использовать: максимальную высоту, эквивалентную высоту и коэффициент поверхности, с последующей оценкой их эффективности (рисунок 4). Расчётные формулы для их определения приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Параметры для характеристики рельефа поверхности на боковых стенках

Параметр рельефа	Определение	Формула
Максимальная высота поверхности ( $h_{max}$ )	Разница между высотами наивысшего пика ( $h_{пик}$ ) и самой глубокой впадины ( $h_{впад}$ ), измеренных от плоскости проекции	$h_{max} = h_{пик} - h_{впад}$
Эквивалентная высота поверхности ( $h_э$ )	Отношение объема рельефа образца ( $V_{рел.обр.}$ ) к площади плоскости проекции ( $S_{проект}$ )	$h_э = \frac{V_{рел.обр.}}{S_{проект}}$
Коэффициент поверхности ( $c_{пов.}$ )	Отношение площади поверхности образца ( $S_{обр.}$ ) к площади плоскости проекции ( $S_{проект}$ )	$c_{пов.} = \frac{S_{обр.}}{S_{проект}}$

Морфология поверхности и отклонения размеров образцов, изготовленных при различных величинах расфокусировки лазера, после их 3D-сканирования представлены на рисунке 5. Из диаграммы видно, что у образцов, полученных при расфокусировке лазера равной  $-1,5$  мм, уровень расположения верхней поверхности значительно ниже по сравнению с образцами, выращенными при других величинах расфокусировки, а это значит, что фактическая высота меньше заданной, т.е. для последующей механической обработки недостаточно припуска.

Следует отметить, что при одинаковом расстоянии расфокусировки, знак её величины по-разному влияет на среднее отклонение от заданного размера наплавки. Так, среднее отклонение от заданного размера наплавки по модулю, при положительных значениях расфокусировки несколько больше, чем при отрицательных значениях (рисунок 6), однако диапазон разброса среднего отклонения в этом случае существенно меньше. Положительная расфокусировка благоприятно сказывается также и на снижении почти в два раза нестабильности высоты верхней поверхности наплавки, что видно из рисунка 7. Это свидетельствует о лучшей способности слоя к формообразованию.

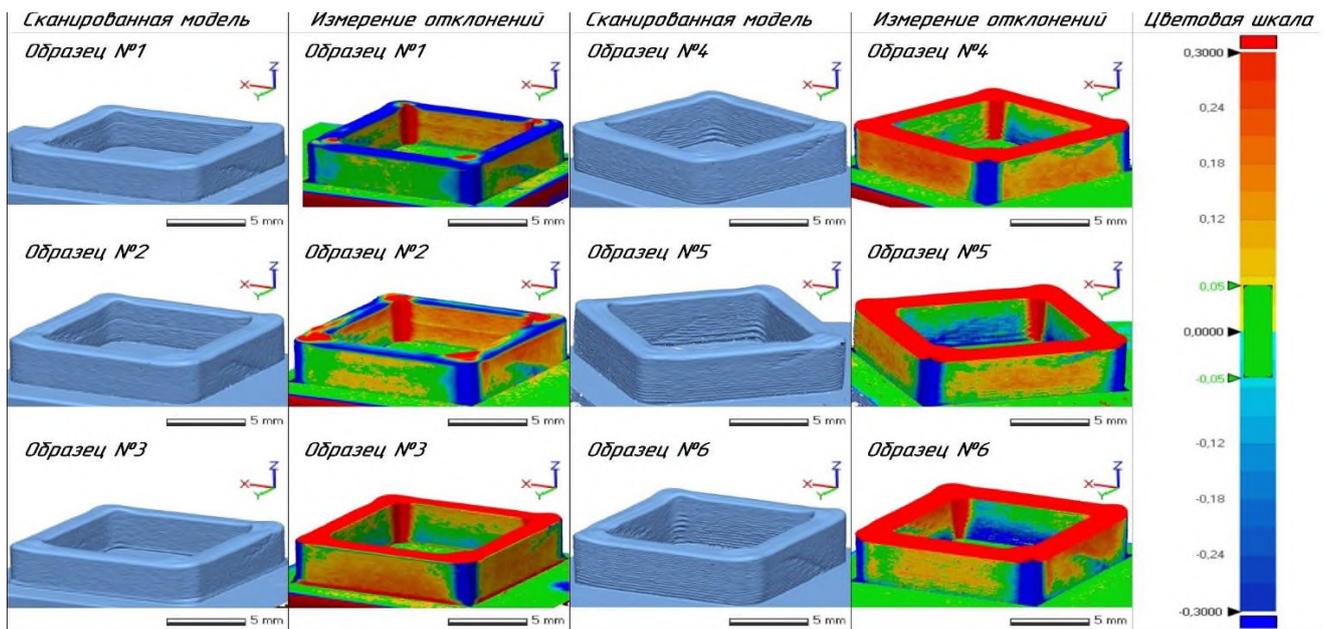


Рисунок 5 – Рельеф поверхности изготовленных образцов при различной величине лазерной расфокусировки: №1  $-1,5$  мм; №2  $-1,0$  мм; №3  $-0,5$  мм; №4  $+0,5$  мм; №5  $+1,0$  мм; №6  $+1,5$  мм

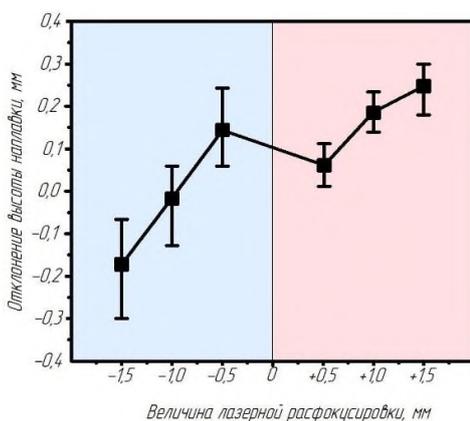


Рисунок 6 – Изменение среднего отклонения от заданного размера верхней поверхности наплавки в зависимости от величины расфокусировки лазера

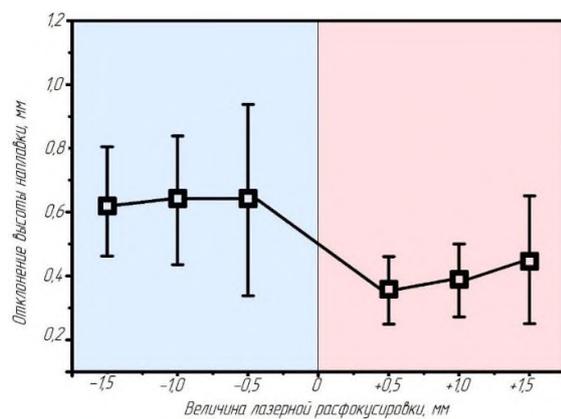


Рисунок 7 – Изменение нестабильности высоты наплавки верхней поверхности в зависимости от величины лазерной расфокусировки

Для оценки эффективности параметров, характеризующих рельеф боковых стенок (таблица 8), было выполнено их сравнение. В качестве показателей для оценки параметров рельефа использовались относительная амплитуда и относительное отклонение рельефа боковой поверхности. На основе сравнения данных показателей установлено, что максимальная высота поверхно-

сти имеет наибольшее значение относительной амплитуды и наименьшее значение относительного отклонения рельефа из чего следует, что этот параметр позволяет лучше различать степень адгезии металлических брызг на боковой поверхности при различных величинах расфокусировки, а также имеет лучшую повторяемость. Из графика, на рисунке 8 видно, что максимальная высота боковой поверхности стенки снижается с уменьшением положительной и увеличением отрицательной расфокусировки лазера.

Это обусловлено тем, что при отрицательной расфокусировке лазера на этапе формирования наружной и внутренней боковых стенок лазерное излучение направлено в сторону стенки. Это обеспечивает лучшее оплавление имеющихся выступов на нижележащих слоях. Кроме того, заметно снижается вероятность попадания и налипания частиц порошка на стенки. При положительной расфокусировке имеет место обратная картина, т.е. лазерное излучение направлено от стенки. Эффект оплавления выступов существенно снижается, а вероятность налипания частиц порошка на стенки возрастает.

Исследование влияния режимов термической обработки на формирование структуры и твёрдость сплава показало, что наибольшая твёрдость  $311 \pm 8$  НВ получена, при многоступенчатом режиме: 1)  $1100 \pm 10^\circ\text{C}$ , выдержка 4 часа и охлаждение на воздухе; 2)  $950 \pm 10^\circ\text{C}$ , выдержка 3,5 часа и охлаждение на воздухе; 3)  $800 \pm 10^\circ\text{C}$ , выдержка 7,5 часов и охлаждение на воздухе; 4)  $700 \pm 10^\circ\text{C}$ , выдержка 14 часов, охлаждение на воздухе.

Наиболее экономичным режимом ТО, обеспечивающим механические характеристики, регламентируемые в нормативной документации, является следующий режим: 1)  $1180 \pm 10^\circ\text{C}$ , выдержка 4 часа и охлаждение на воздухе; 2)  $900 \pm 10^\circ\text{C}$ , выдержка 16 часов и охлаждение на воздухе, что обеспечивает получение твёрдости равной  $236 \pm 29$  НВ.

**В четвёртой главе** изложена методика проектирования ТП изготовления крупногабаритных заготовок камер сгорания ГТД по технологии ПЛВ, базирующаяся на разработанной и представленной в главе 2, математической модели взаимодействия лазерного излучения и МПК.

Основными этапами изготовления заготовок по технологии ПЛВ, являются: 1) анализ исходных данных и разработка 3D модели заготовки детали; 2) определение рациональных технологических параметров ПЛВ; 3) определение стратегии изготовления заготовки; 4) моделирование процесса ПЛВ; 5) изготовление заготовки методом ПЛВ; 6) постобработка изготовленной заготовки; 7) контроль её качества. Для этапа выращивания заготовки определены факторы, влияющие на процесс изготовления и включающие как параметры ПЛВ (мощность, скорость выращивания, расход МПК), так и параметры, связанные с геометрией заготовки детали (дополнительные технологические припуски, рёбра жёсткости). Все эти факторы учтены при разработке методики проектирования ТП ПЛВ.

Блок-схема алгоритма методики, представленная на рисунке 9, содержит: блок проектирования заготовки; блок определения рациональных технологических параметров процесса ПЛВ; блок подготовки управляющей программы и изготовления заготовки; блок, определяющий проведение термической обработки; блок коррекции геометрии заготовок и блок контроля. Коррекция геометрии заготовки необходима для компенсации деформаций, возникающих под воздействием термических остаточных напряжений, формируемых в процессе ПЛВ.

Следует отметить, что для более эффективного использования метода ПЛВ при изготовлении заготовок деталей ГТД были разработаны рекомендации по проектированию геометрических элементов заготовок. Данные рекомендации позволяют учитывать технологические особенности процесса ПЛВ и тем самым минимизировать последующую механическую обработку.

**В пятой главе** представлены результаты апробации методики проектирования ТП ПЛВ крупногабаритных заготовок камер сгорания ГТД на примере создания ТП изготовления заготовок деталей «Кожух внутренний камеры сгорания» и «Кожух наружный камеры сгорания» ГТД (рисунк 10).

В соответствии с алгоритмом, представленным в **главе 4**, при разработке ТП выполнен технологический анализ чертежей деталей «Кожух внутренний камеры сгорания» и «Кожух наружный камеры сгорания» ГТД с целью определения возможности использования технологии ПЛВ для изготовления заготовок, созданы технологические модели заготовок, а также проведено их деление на простые элементы и разработаны управляющие программы применительно к роботизированной уста-

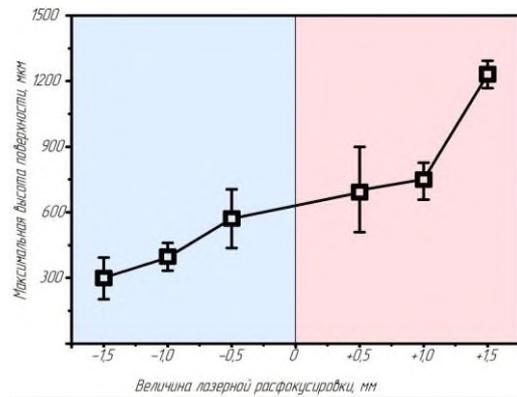


Рисунок 8 – Изменение максимальной высоты поверхности в зависимости от величины лазерной расфокусировки

новке ИЛИСТ-Л с рациональными технологическими режимами ПЛВ, обеспечивающими выполнение требований к шероховатости всех поверхностей, точности размеров и отклонениям формы.

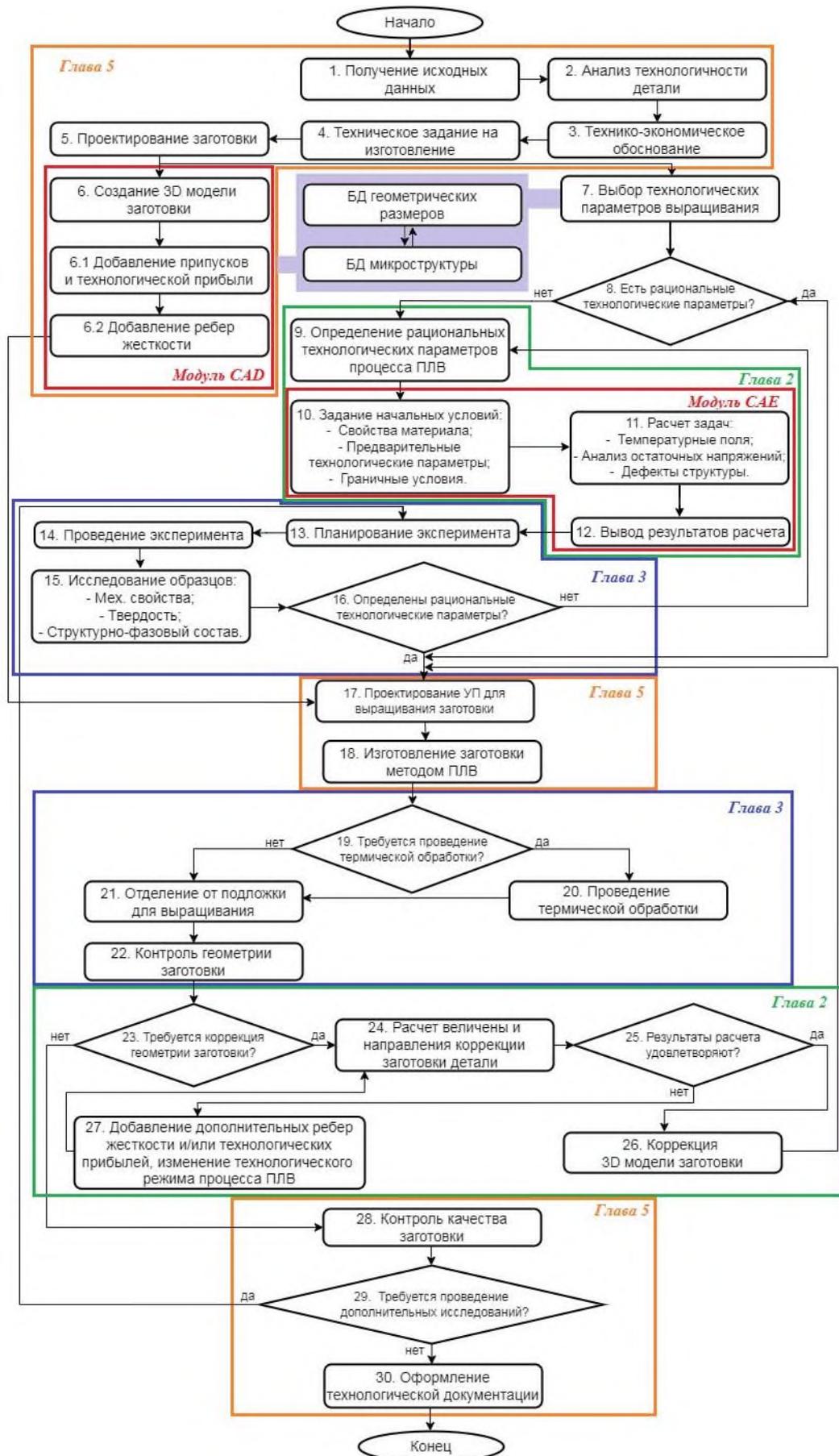


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма проектирования ТП процесса ПЛВ

Выполненное технико-экономическое обоснование выбора технологии ПЛВ для изготовления заготовок деталей «Кожух внутренний камеры сгорания» и «Кожух наружный камеры сгорания» ГТД показало, что при использовании этой технологии достигается экономия материала ЭП648 в размере 37,7 кг и 100,7 кг соответственно. Кроме того, ТП для каждой детали сокращается на 180 операций, а время изготовления уменьшается на 400 н/ч и 625 н/ч соответственно. ТП изготовления указанных ранее заготовок из МПК жаропрочного сплава ЭП648 на аддитивной установке ИЛИСТ-L включал также термическую обработку и контроль. В результате реализации ТП изготовлены заготовки, а из них детали «Кожух внутренний камеры сгорания» и «Кожух наружный камеры сгорания». На основании испытаний данных деталей в составе технологического двигателя на стенде ПАО ОДК Кузнецов конструкторская и технологическая документация допущены в серийное производство.



Рисунок 10 – Изготовленные крупногабаритные заготовки (сверху) и детали (внизу) КС ГТД:  
а) кожух наружный камеры сгорания; б) кожух внутренний камеры сгорания

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено решение актуальной научно-технической задачи в области авиационного двигателестроения, направленной на повышение производительности труда и снижение трудоёмкости при производстве ГТД за счёт разработки технологического процесса изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД методом прямого лазерного выращивания из жаропрочной металлопорошковой композиции.

В процессе выполнения работы были получены следующие результаты:

1 Разработана аналитическая математическая модель взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции для процесса прямого лазерного выращивания, позволяющая выполнить численное исследование технологических параметров выращивания заготовок из различных металлопорошковых композиций, отличающаяся от известных решений постановкой задачи учёта полноты плавления металлопорошковой композиции вне зоны ванны расплава. Определены диапазоны рациональных технологических параметров процесса прямого лазерного выращивания заготовок из металлопорошковой композиции жаропрочного никелевого сплава ЭП648, гарантированно обеспечивающие заданный комплекс физико-механических и химических свойств для выращенного материала: мощность лазерного излучения, 1800-2000 Вт; расход металлопорошковой композиции, 20-31 г/мин; скорость 20-30 мм/с.

2 Исследовано влияние основных технологических параметров выращивания и параметров термической обработки на механические свойства (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и твёрдость), а также на формирование геометрии, структуры и трещинообразование наплавляемого жаропрочного сплава ЭП648. Получены регрессионные модели влияния мощности лазерного излучения на предел прочности при растяжении, относительное удлинение и твёрдость образцов до и после термообработки. На основе статистической обработки данных определены рациональные технологические параметры: мощность лазера – 2000 Вт, скорость выращивания – 25 мм/с, расход металлопорошковой композиции – 26,6 г/мин, технологическая пауза – 40 с, обеспечивающие максимальную прочность и требуемое качество материала.

3 Исследовано влияние величины расфокусировки лазера на параметры рельефа верхней и боковых поверхностей заготовок, геометрическую точность получаемых размеров, предложены параметры для оценки качества верхней поверхности и боковых стенок заготовок. Разработана база данных влияния условий процесса прямого лазерного выращивания на геометрические размеры и микроструктуру образцов из сплава ЭП648, необходимая для проектирования технологического процесса изготовления заготовок ГТД.

4 Разработана методика и на её основе технологический процесс изготовления заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД из жаропрочного сплава ЭП648 методом прямого лазерного выращивания; выполнено изготовление указанных заготовок. Проведены испытания в составе технологического двигателя на ПАО «ОДК Кузнецов» разработанного технологического процесса и установлено, что характеристики изготовленных кожухов из заготовок, полученных методом прямого лазерного выращивания соответствуют установленным требованиям, а конструкторская и технологическая документация допущены в серийное производство.

5 Использование технологии прямого лазерного выращивания при изготовлении заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» обеспечило повышение производительности труда в 2,5 раза, снижение трудоёмкости на 1025 н/ч и уменьшение веса заготовок на 138,4 кг при обеспечении требований конструкторской документации.

Перспектива дальнейшего развития темы состоит в совершенствовании технологического процесса изготовления заготовок ГТД посредством дополнения методики новыми технологическими процессами и результатами определения рациональных технологических параметров прямого лазерного выращивания для различных материалов. Перспективным направлением является совершенствование управления параметрами качества заготовок, получаемых технологией прямого лазерного выращивания, с целью повышения стабильности технологического процесса изготовления деталей ГТД.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

##### Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Балякин, А.В.** Влияние термической обработки на структуру и свойства заготовок из жаропрочных никелевых сплавов, полученных по аддитивным технологиям / **А.В. Балякин**, Е.А. Носова, М.А. Олейник // Вестник Московского авиационного института. – 2023. – Т. 30. – № 3. – С. 209-219.
2. **Балякин, А.В.** Влияние режимов прямого лазерного выращивания на формообразование одиночных валиков и стенок из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ / М. А. Олейник, **А.В. Балякин**, Д.Л. Скуратов [и др.] // Вестник Московского авиационного института. – 2022. – Т. 29. – № 4. – С. 243-255.
3. **Балякин, А.В.** Применение прямого лазерного сплавления металлических порошков из жаропрочных сплавов в двигателестроении / **А.В. Балякин**, Д.Л. Скуратов, А.И. Хаймович, М.А. Олейник // Вестник Московского авиационного института. – 2021. – Т. 28. – № 3. – С. 202-217. – DOI 10.34759/vst-2021-2-202-217.
4. **Балякин, А. В.** Обзор гибридного аддитивного производства металлических деталей / **А.В. Балякин**, М.А. Олейник, Е.П. Злобин, Д.Л. Скуратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2022. – Т. 21. – № 2. – С. 48-64. – DOI 10.18287/2541-7533-2022-21-2-48-64.
5. **Балякин А.В.** Модель взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции в процессе прямого лазерного выращивания заготовок для деталей газотурбинных двигателей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 4. С. 99-111. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-99-111.

##### Статьи в других изданиях

1. Носова, Е.А. Исследование влияния отжига на микроструктуру и твёрдость сплава ЭП648 после прямого лазерного выращивания / Е.А. Носова, **А.В. Балякин**, М.А. Олейник // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2023. – Т. 20. – № 1. – С. 115-122. – DOI 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.014.
2. **Балякин, А.В.** Процесс прямого лазерного выращивания жаропрочного сплава: влияние мощности и термической обработки на микроструктуру и механические характеристики / **А.В. Балякин** // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2023. – № 4(46). – С. 64-78.

##### Статьи в изданиях, индексируемых базой данных Scopus

1. Oleynik, M. Determining the optimal mode of the inconel 718 alloy deposition at a direct laser deposition plant / M. Oleynik, A. Khaimovich, **A. Balyakin** // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P. 3-12. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.3.
2. Oleynik, M. Development of a calibration technique of a finite element model for calculating compensation of deformations from the action of residual stresses in additive manufacturing / M. Oleynik, **A. Balyakin**, A. Khaimovich, E. Zlobin // E3S Web of Conferences, Voronezh, 09–13 октября 2023 года. Vol. 458. – Voronezh: EDP Sciences, 2023. – P. 02023. – DOI 10.1051/e3sconf/202345802023.
3. Oleynik, M. Influence of direct metal deposition modes on the shaping of single tracks and walls made of heat-resistant powder material / M.A. Oleynik, **A.V. Balyakin**, E.P. Zlobin, E.S. Goncharov // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2573, No. 1. – P. 012006. – DOI 10.1088/1742-6596/2573/1/012006.
4. Nosova, E.A. Effect of Annealing on the Microstructure and Hardness of EP648 Alloy after Direct Metal Deposition / E.A. Nosova, **A.V. Balyakin**, M.A. Oleynik // Physics of the Solid State. – 2023. – Vol. 65, No. 1. – P. 32-35. – DOI 10.1134/s1063783423700075.