



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574  
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,  
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,  
г. Санкт-Петербург, 195251  
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

на № 2104.2025 от № 66-УдМ

Проректор по научной работе  
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Ю.В. Фомин



«18» апреля 2025 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на диссертационную работу Балякина Андрея Владимировича «Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД методом прямого лазерного выращивания», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

### Актуальность темы диссертации

В условиях, когда требования к газотурбинным двигателям (ГТД) становятся всё более жёсткими, необходимо разрабатывать новые конструкции компонентов и узлов, а также использовать передовые технологии, которые позволят снизить трудоёмкость производства. Одной из таких технологий является прямое лазерное выращивание (ПЛВ). Этот метод обеспечивает высокий коэффициент использования материала и позволяет получать заготовки с минимальным припуском для последующей обработки. Применение ПЛВ при производстве кожухов камер сгорания ГТД позволит сократить время изготовления в два раза. Это связано с тем, что ПЛВ обладает рядом преимуществ, таких как высокий коэффициент использования материала и возможность получения заготовок с минимальным припуском для последующей обработки. Разработка технологического процесса изготовления заготовок крупногабаритных деталей ГТД методом ПЛВ является сложной, комплексной задачей, требующей учёта множества факторов для последующего выбора рационального режима их изготовления на основе математического моделирования взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции. Применение технологии ПЛВ для изготовления крупногабаритных заготовок деталей камер сгорания ГТД является экономически выгодным направлением совершенствования технологий производства, что позволит значительно

Входящий № 206-3279  
Дата 23 АПР 2025  
Самарский университет

повысить эффективность производства ГТД. Это исследование 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.

### **Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего в себя 183 наименования. Работа содержит 232 страниц машинописного текста, 89 рисунков, 46 таблиц и 1 приложения.

Во **Введении** обоснована актуальность исследования, степень её разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость выполненной работы, описаны методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, обусловлена степень достоверности полученных результатов и представлена информация по апробации результатов.

В **первой главе** диссертации проводится анализ применения аддитивных технологий, в частности прямого лазерного выращивания (ПЛВ), для создания крупных заготовок деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), включая камеры сгорания. В работе рассматриваются преимущества использования аддитивных технологий, в частности ПЛВ, которые позволяют создавать сложные крупногабаритные заготовки, близкие к конечной форме деталей, с минимальными затратами материалов и времени по сравнению с традиционными методами. Описываются технологические параметры процесса ПЛВ, такие как мощность лазерного излучения, размер пятна и профиль луча, удельная энергия, расход металлопорошковой смеси анализируется их влияние на качество формирования заготовки, деформации и остаточные напряжения в ней. Также рассматривается влияние расфокусировки лазера на рельеф поверхности заготовки, получаемой в процессе ПЛВ. Исследуется фазовый состав высоколегированного жаропрочного сплава на основе никеля, полученного в процессе ПЛВ. Описываются возможные дефекты, возникающие в процессе ПЛВ жаропрочного никелевого сплава. На основе анализа литературы автор делает вывод, что технология прямого лазерного выращивания является наиболее эффективным методом для производства крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД, включая детали камеры сгорания. Автор ставит перед собой цель повысить производительность изготовления крупногабаритных деталей авиационных ГТД с использованием технологии прямого лазерного выращивания на основе разработки методики, обеспечивающей получение требуемых характеристик заготовки за счёт определения рациональных технологических параметров прямого лазерного выращивания.

Во **второй главе** разрабатывается модель взаимодействия лазерного излучения с металлопорошковой композицией (МПК) с целью определения диапазона рациональных технологических параметров прямого лазерного выращивания. Приводится описание процесса ПЛВ и используемой аддитивной установки. Условием для определения параметров технологического режима ПЛВ является требование полного расплавления каждой частицы МПК в газопорошковой струе с образованием ванны расплава на поверхности заготовки. Исследуется передача тепловой энергии лазерного луча частицам МПК в процессе их перемещения от среза сопла установки ПЛВ до выращиваемой заготовки и анализируются предпосылки их расплавления. Для этой цели разрабатывается математическая модель, основанная на законе Бера–Ламберта. С использованием разработанной модели проведено численное моделирование процесса нагрева и плавления частиц МПК разных размеров в

зависимости от параметров прямого лазерного выращивания: скорости газопорошковой струи, насыпной плотности МПК, среднего радиуса МПК и мощности лазера, а также расстояния до зоны расплавления МПК. По результатам численного эксперимента установлены диапазоны рациональных значений технологических параметров процесса ПЛВ.

В **третьей главе** представлены результаты исследования физико-механических свойств жаропрочного никелевого сплава ЭП648, полученного технологией ПЛВ. В экспериментальных исследованиях. Изучалось влияние параметров технологических режимов ПЛВ на предел прочности при испытаниях на растяжение и наличие дефектов в структуре материала. Структура материала исследовалась на вырезанных в продольном и поперечном направлении относительно направления выращивания шлифах, полученных из образцов, выращенных при значениях мощности от 1200 до 2200 Вт. По результатам экспериментов получены регрессионные зависимости влияния мощности лазерного излучения на механические свойства образцов в продольном и поперечном направлениях в состоянии до и после проведения термообработки. Зависимости были использованы для определения рациональных параметров ПЛВ.

Вторая часть **третьей главы** посвящена изучению влияния лазерной расфокусировки на точность получаемых размеров и качество поверхности. Сформированный рельеф поверхностей заготовки имеет ярко выраженные особенности в виде слоёв и колебаний высоты наплавления на верхней части заготовки и налипших выступов на боковых стенках. Автором диссертации предложены показатели геометрии рельефа характеризующие его особенности. В работе отмечено, что положительная расфокусировка уменьшает нестабильность высоты верхней поверхности наплавки, а максимальная высота боковой поверхности стенки снижается с уменьшением положительной и увеличением отрицательной расфокусировки лазера. Также представлены результаты влияния режимов термической обработки на формирование структуры и твёрдость жаропрочного никелевого сплава.

В **четвертой главе** изложена методика проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок авиационных ГТД по технологии ПЛВ, базирующаяся на разработанной в главе 2 математической модели взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции. Определены этапы изготовления заготовок по технологии ПЛВ. Методика представлена в виде блок-схемы алгоритмов проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок по технологии ПЛВ. Методика включает алгоритм разработки заготовки детали, алгоритм определения рациональных технологических параметров процесса ПЛВ, алгоритм коррекции заготовки детали. Для 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 технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок ГТД методом ПЛВ была проведена на примере заготовок деталей камеры сгорания «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания», изготавливаемых из жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648. В результате реализации спроектированного технологического процесса были изготовлены заготовки, а из них детали «Кожух внутренний камеры сгорания» и «Кожух наружный камеры сгорания» и проведены испытания данных деталей в составе технологического двигателя на стенде ПАО ОДК Кузнецов.

В **заключении** представлены результаты и выводы, отражающие итоги исследования.

Содержание диссертации изложено в логически последовательной форме. Автореферат и публикации соискателя в полной степени отражают её наиболее существенные положения, выводы и рекомендации. Работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ к диссертациям, предъявленным на соискание ученой степени кандидата технических наук.

### **Научная новизна**

В ходе научных исследований автором диссертации получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

– создана аналитическая математическая модель, описывающая взаимодействие лазерного излучения и металлопорошковой смеси в процессе прямого лазерного выращивания, модель позволяет определить зависимости между технологическими параметрами процесса прямого лазерного выращивания и отличается от предыдущих решений тем, что учитывает полное расплавление металлопорошковой композиции до её попадания в ванну расплава;

– на основе созданной и проверенной в ходе экспериментов математической модели был выполнен численный эксперимент, результаты которого позволили определить границы оптимальной области технологических параметров режима прямого лазерного выращивания, что дало возможность использовать метод регрессионного анализа для поиска оптимальных значений;

– методом регрессионного анализа было определено рациональное значение мощности лазерного излучения при сплавлении металлопорошковой композиции жаропрочного сплава ЭП648 на основе данных натурального эксперимента, направленного на определение механических характеристик в состоянии до и после термообработки. В отличие от существующих подходов, предложенный позволил сузить область многокритериального поиска до одного параметра — мощности лазерного излучения, учитывая результаты теоретического моделирования;

– исследованы закономерности воздействия степени расфокусировки лазерного луча на точность геометрических характеристик и рельеф поверхностей заготовок. В отличие от существующих подходов, были предложены новые критерии оценки изменений рельефа поверхностей, вызванных воздействием лазерного излучения;

– разработана методика проектирования технологических процессов производства крупногабаритных заготовок деталей авиационных газотурбинных двигателей методом прямого лазерного выращивания. Методика включает в себя аналитическую модель взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции, регрессионные зависимости и базу знаний для определения оптимальных значений технологических параметров. Также предложен метод повышения геометрической точности заготовки путём численного моделирования процесса.

Полученные результаты соответствуют п. 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.

## **Практическая значимость**

За счёт разработанной методики проектирования технологических процессов ПЛВ крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД, были разработаны алгоритмы проектирования заготовок и технологических процессов, определение рациональных технологических параметров процесса ПЛВ, что позволило добиться снижения трудоёмкости, увеличения производительности и повышения качества изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД. Установлены закономерности влияния технологических режимов термической обработки на анизотропию свойств, микроструктуру и механические жаропрочного свойства сплава ЭП648. Для этого была создана база данных «Геометрические размеры и микроструктура образцов из сплава ЭП648, полученных прямым лазерным выращиванием», что подтверждено свидетельством RU 2024620533.

По разработанной методике спроектирован и реализован технологический процесс изготовления крупногабаритных заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД по технологии ПЛВ из отечественной МПК – жаропрочного никелевого сплава ЭП648. Практическая ценность результатов работы подтверждается актами об использовании результатов диссертационной работы Балякина А.В. в процессе проектирования технологических процессов и изготовлении деталей и узлов горячей части газотурбинных двигателей и энергетических установок на ПАО «ОДК-Кузнецов» и АО «Самарские авиадвигатели».

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).

## **Обоснованность и степень достоверности полученных результатов**

Обоснованность и достоверность основных положений и выводов обеспечивается 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. При написании диссертации соискатель дал все необходимые ссылки на авторов и источники литературы, откуда он заимствовал материалы или отдельные результаты.

## **Подтверждение основных результатов диссертации в научной печати**

Результаты работы были апробированы на более чем 10 научно-технических конференциях и семинарах всероссийского и международного уровней и известны научной общественности.

По результатам работы опубликовано 25 работ, из них: 7 научных работ опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК России, 4 работы опубликованы в научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 14 тезиса докладов на международных научно-технических и научно-практических конференциях, получено 3 патента на изобретения и 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Разработанная автором методика позволяет в относительно короткий срок спроектировать технологический процесс изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД и изготовить на его основе заготовки методом прямого лазерного выращивания.

Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию в ПАО «ОДК-Кузнецов», АО «ОДК-Авиадвигатель», «ОКБ им. А. Льюльки» филиал ПАО «ОДК-УМПО», ПАО «ОДК-Сатурн», АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», АО «ОДК» «НИИД», ПАО «ОДК-УМПО», АО «ЦАТ» АО «Силовые машины» и других организациях, занимающихся производством крупногабаритных изделий и газотурбинных двигателей.

### **Замечания по диссертационной работе**

Наряду с перечисленными выше достоинствами работа не лишена недостатков, в частности:

1) Аналитическая модель передачи тепловой энергии лазерного луча частицам МПК до их полного расплавления в газопорошковой струе в зависимости от условий ПЛВ доведена до решения численными методами. Однако отсутствует валидация модели по итогам сравнения с реальными экспериментальными данными. Добавление такого анализа повысило научную значимость результатов. В работе также не обсуждаются возможные ограничения на использование разработанной модели для различных видов порошковых материалов.

2) Исследование фокусируется на одном типе материала — жаропрочном сплаве ЭП648. Для более широкого применения результатов исследования следовало бы рассмотреть другие материалы.

3) Полученные диапазоны рациональных значений технологических параметров (таблица 2.19) могут быть использованы для настройки процесса ПЛВ в производственных условиях. Однако для практического использования целесообразно провести дополнительные исследования для учёта влияния других факторов, таких как геометрия детали и условия теплоотвода.

4) Некоторые формулы (например, 2.10–2.12) требуют дополнительных комментариев для лучшего понимания их применения.

5) Единицы измерения и форматы таблиц следует стандартизировать для удобства чтения.

6) Текст содержит большое количество технических деталей, что делает его полезным для специалистов в области аддитивных технологий. Однако для неподготовленного читателя материал может быть сложным для восприятия. Возможно, стоит добавить более простые объяснения или рисунки для лучшего понимания процесса.

Указанные замечания не снижают ценность и общую положительную оценку диссертационной работы, не влияют на основные научные и практические результаты и не затрагивают основных положений, вынесенных соискателем на защиту.

## Заключение

Диссертационная работа Балякина А.В. является завершённой научно-квалификационной работой и соответствует паспорту специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов. Научные и практические положения диссертационного исследования можно охарактеризовать как решение актуальной научной задачи, имеющей существенное значение для развития теоретических основ проектирования технологических процессов и изготовления крупногабаритных деталей авиационных двигателей и энергетических установок и их элементов, а именно задачи по созданию заготовок крупногабаритных деталей горячей части с применением аддитивных технологий.

Работы автора опубликованы в установленные сроки, в том числе в ряде ведущих реферируемых изданий с высоким индексом цитирования, и в полной мере отражают основные результаты диссертации. Научные положения, выносимые на защиту, достаточно полно представлены в опубликованных работах. Автореферат в полной мере отражает содержания и основные положения диссертационного исследования.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне, содержит результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью и отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а её автор, Балякин Андрей Владимирович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Диссертационная работа А.В. Балякина на тему «Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД методом прямого лазерного выращивания» и отзыв на неё обсуждены и одобрены на заседании научно-образовательного центра «Конструкционные и функциональные материалы» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (протокол № 2 от 27.03.2025 г.) и представлен на 8 (восемь) страницах печатного текста.

Отзыв составили:

Директор института машиностроения,  
материалов и транспорта, ФГАОУ ВО «СПбПУ»  
д.т.н., профессор



Попович  
Анатолий Анатольевич  
11.04.2025 г.

Ведущий научный сотрудник лаборатории  
«Дизайн материалов и аддитивного производства»,  
ФГАОУ ВО «СПбПУ», к.т.н.



Сотов  
Антон Владимирович  
11.04.2025 г.

Сведения о ведущей организации:

Наименование организации: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,

Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б

Телефон: +7 (812) 775-05-30,

Электронная почта: office@spbstu.ru

Сайт: <https://www.spbstu.ru>

Я, Попович Анатолий Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в аттестационные документы, связанные с защитой диссертации Балякина Андрея Владимировича «Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД методом прямого лазерного выращивания» и их дальнейшую обработку.

  
/ А.А. Попович

Я, Сотов Антон Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в аттестационные документы, связанные с защитой диссертации Балякина Андрея Владимировича «Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД методом прямого лазерного выращивания» и их дальнейшую обработку.

  
/ А.В. Сотов