

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», д.т.н., доцент



Иванов А.В.

«02» 12 2025 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на диссертационную работу Олейника Максима Андреевича «Разработка методики прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД», 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 крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД позволяет сократить время изготовления в два раза. Это связано с тем, что преимущества данного метода позволяют обеспечить значительную эффективность процесса благодаря экономии материала и сокращению этапов механической обработки. Повышение точности изготовления заготовок крупногабаритных деталей ГТД является сложной, комплексной задачей, требующей учёта множества факторов. Применение технологии ПЛВ для

изготовления крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД является экономически выгодным направлением совершенствования технологий производства, что позволяет значительно 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 95 наименований. Работа содержит 132 страницы машинописного текста, 63 рисунков, 12 таблиц и 1 приложение.

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** проведен комплексный анализ проблемы получения крупногабаритных заготовок, выявивший существенные недостатки традиционных технологий, связанные с большими припусками на механическую обработку и высокой ресурсоемкостью. Установлено, что технология ПЛВ позволяет значительно уменьшить величину припуска за счет получения заготовок, геометрия которых близка к геометрии готовой детали. В ходе анализа технологических особенностей ПЛВ выявлены ключевые проблемы, ограничивающие ее широкое промышленное применение: недостаточная точность позиционирования инструмента и отсутствие специализированных средств технологической подготовки для роботизированных установок.

Во **второй главе** представлена разработанная математическая модель формирования траекторий многоосевой наплавки для роботизированных установок ПЛВ, оснащенных двухосевым позиционером. Основной научной проблемой, решаемой в рамках данной модели, является устранение неопределенности положения элементов технологической системы, обусловленной наличием избыточных степеней свободы в кинематической цепи «шестиосевой робот - двухосевой позиционер».

Модель основана на принципе декомпозиции движения рабочего инструмента по сложной траектории на две составляющие: прямолинейное перемещение инструмента и дуговое движение за счет поворота позиционера. Для формализации процесса преобразования координат разработаны матричные зависимости, позволяющие осуществлять

переход между системами координат заготовки и позиционера с учетом углов наклона и поворота позиционера.

Важным аспектом модели является учет технологических погрешностей, возникающих при замене линейной интерполяции на комбинированную круговую и линейную. Для этого введены расчетные зависимости для определения максимальной погрешности отклонения от линейной траектории и относительной погрешности приращения радиусов возможного поворота. Дополнительно учтены кинематические ограничения поворотной оси позиционера, связанные с невозможностью обеспечения требуемой скорости наплавки вблизи оси вращения.

**Третья глава** посвящена разработке специализированных средств технологической подготовки, реализующих предложенную математическую модель. Созданный программный комплекс представляет собой конвертор траекторий, выполняющий преобразование исходных данных в формат, адаптированный под кинематические особенности роботизированной ячейки.

Архитектура программного обеспечения включает модуль решения обратной задачи кинематики с учетом динамических характеристик оборудования. Алгоритм работы предусматривает последовательную обработку пар точек траектории с определением промежуточных положений инструмента и расчетом углов поворота звеньев робота и позиционера. Выходными данными являются управляющие программы в адаптированном формате и файлы для симуляции движений в САМ-системах.

В **четвертой главе** проведена комплексная систематизация технологических ограничений ПЛВ, сгруппированных по трем основным категориям: технологические, геометрические и кинематические. В рамках технологических ограничений детально проанализированы проблемы недостаточной адгезии с платформой построения, волнистости слоя и валика, коробления тонких стенок и нестабильности процесса выращивания. Для геометрических ограничений рассмотрены вопросы формирования нависающих элементов и радиальных отверстий. Кинематические ограничения включают проблемы несоосности при переходе между поверхностями и обеспечения точности позиционирования. Для каждого типа ограничений разработаны практические рекомендации для их учета. На основе проведенного анализа предложены модели формирования слоев и генерации управляющих программ, адаптированные для интеграции в отечественную САМ-систему.

**Пятая глава** представляет комплексную методику прямого лазерного выращивания, интегрирующую все разработанные решения. Ключевым элементом методики является оригинальный алгоритм многоуровневого выращивания, основанный на процедуре копирования траекторий базового слоя. Алгоритм включает определение внешних контуров

и внутренних островов на каждом уровне построения, построение эквидистантных контуров с заданной точностью, проекцию контуров на геометрию детали и циклическое повторение траекторий до достижения заданной высоты.

Экспериментальная апробация методики проводилась на двух уровнях. На первом этапе выращены технологические пробы для исследования микроструктуры и геометрической точности. Результаты металлографического анализа показали отсутствие несплавлений между валиками и соответствие геометрических размеров заданным параметрам. На втором этапе изготовлена крупногабаритная заготовка детали «Кольцо наружное ВНА». Сравнительный анализ эффективности разработанной методики показал значительное улучшение технологических показателей.

**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:

– Разработана математическая модель формирования траекторий многоосевой наплавки для роботизированных установок прямого лазерного выращивания, использующих двухосевой позиционер. Её отличительной особенностью является алгоритм, позволяющий формировать рациональные траектории для формообразования крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД, геометрия которых аппроксимирует осесимметричные поверхности, что обеспечивает повышение точности позиционирования инструмента за счёт оптимального распределения движений между роботом и позиционером.

– Впервые систематизированы и формализованы технологические ограничения прямого лазерного выращивания применительно к производству крупногабаритных корпусных деталей ГТД. Предложенная классификация и модели учёта ограничений, адаптированные для интеграции в интерфейс пользователя САМ-систем, позволяют осуществлять корректное формирование траекторий многоосевой наплавки на этапе технологической подготовки.

– Разработана комплексная методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД, основным отличием которой является применение оригинального алгоритма многоуровневого выращивания. Данный алгоритм, в сочетании с использованием предложенной математической модели формирования

траекторий, позволяет существенно сократить время генерации управляющих программ и снизить трудоёмкость технологической подготовки.

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**

Разработанная методика напрямую способствует снижению материалоемкости и трудоемкости изготовления. За счет применения математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки и алгоритма многоуровневого выращивания достигается значительное повышение точности позиционирования инструмента, что позволяет уменьшить припуски на механическую обработку. Это подтверждено апробацией на примере детали «Кольцо наружное ВНА»: масса заготовки сократилась на 43%, а трудоемкость изготовления более чем в два раза по сравнению с традиционной технологией.

Созданные средства технологической подготовки автоматизируют процесс генерации управляющих программ для роботизированных установок ПЛВ, сокращая время их создания и минимизируя необходимость в многочисленных ручных симуляциях.

Результаты работы внедрены на ведущих предприятиях авиадвигателестроения, таких как ПАО «ОДК-Кузнецов» и АО «Самарские авиадвигатели», а также интегрированы в отечественную САМ-систему «ADEM», что подтверждает их высокую готовность к промышленному применению и вклад в импортозамещение. 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 научно-технических конференциях и семинарах всероссийского и международного уровней и известны научной общественности.

По результатам работы опубликовано 10 работ, в том числе 5 статей опубликовано в рецензируемых периодических изданиях, рекомендованных ВАК России, 4 статьи опубликованы в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, и одно свидетельство о государственной регистрации базы данных.

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

Разработанная автором методика позволяет повысить эффективность производства крупногабаритных заготовок корпусных деталей авиационных ГТД за счет снижения материалоемкости и трудоемкости изготовления.

Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию в ПАО «ОДК-Кузнецов», АО «ОДК-Авиадвигатель», «ОКБ им. А. Люльки», ПАО «ОДК-УМПО», ПАО «ОДК-Сатурн», АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», АО «ОДК» «НИИД», ПАО «ОДК-УМПО», АО «ЦАТ», АО «Силовые машины» и в 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) Не представлено сравнение разработанных алгоритмов управления позиционирование манипулятора и существующих реализаций в коммерческом ПО.

2) Из текста работы не до конца понятно, каким образом будет модифицирован алгоритм при изготовлении неосесимметричных изделий и при повороте системы координат (например, изготовление фланцев на торцевых поверхностях, полки и т.д.).

3) Заявленная точность позиционирования составляет 0,14 мм, однако отсутствуют конкретные сведения о применяемых средствах измерения и откуда эти значения были получены.

4) Диссертационное исследование ограничивается рассмотрением работа производства компании Fanuc, тогда как в общем случае оборудование ПЛВ других

производителей будут обладать другой конструкцией и алгоритмами управления, поэтому не ясны границы применения предложенных решений.

5) В диссертации приводится систематизация ограничений на технологию ПЛВ, которые необходимо учесть при проектировании технологии в САМ- системе. Предлагаемые ограничения изложены в виде рекомендации и носят описательный характер. Не показано, какие из них оказывают влияние на формирование траектории наплавления и предлагаются к реализации в программном обеспечении, а какие являются только технологическими параметрами и не влияют на формирование траектории наплавления. Не раскрываются особенности системы параметров в контексте изготовления деталей ГТД.

6) Необходимо более подробно раскрыть вопрос применения ПЛВ и разработанных в диссертации решений для изготовления крупногабаритных заготовок деталей ГТД, подробно показать преимущества перехода от традиционных технологий в части оптимизации напусков и припусков, снижения не только материалоемкости для конкретной операции, но и снижение трудоемкости в контексте всего производственного цикла изготовления.

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 Олейника М.А. является завершенной 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 корпусных деталей ГТД с применением аддитивных технологий.

Работы автора опубликованы в установленные сроки, в том числе в ряде ведущих рецензируемых 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, Олейник Максим Андреевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Диссертационная работа М.А. Олейника на тему «Разработка методики прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД» и отзыв на неё обсуждены и одобрены на заседании кафедры 205 «Технология производства двигателей летательных аппаратов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (Протокол 19/25 от 19.11.2025) и представлен на 8 (восьми) страницах печатного текста.

Заведующий кафедрой №205  
«Технология производства двигателей  
летательных аппаратов», д.т.н. по  
специальности 05.07.05, профессор,  
член-корреспондент РАН

Евгений Ювенальевич Марчуков

Доцент кафедры №205 «Технология  
производства двигателей летательных  
аппаратов», к.т.н. по специальности  
05.07.05

Алексей Владимирович Ионов

Сведения о ведущей организации:

Наименование организации: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Адрес: 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4

Телефон: +7 (499) 158-29-77

Электронная почта: [mai@mai.ru](mailto:mai@mai.ru)

Сайт: <https://www.mai.ru>