

ОЛЕЙНИК МАКСИМ АНДРЕЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

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;

Сотов Антон Владимирович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доцент Научно-образовательного центра «Конструкционные и функциональные материалы», ведущий научный сотрудник лаборатории «Дизайн материалов и аддитивного производства».

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита диссертации состоится 22 декабря 2025 года 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: http://ssau.ru/resources/dis_protection/.

Автореферат разослан « » октября 2025 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета 24.2.379.10

доктор технических наук, доцент

А.С. Виноградов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. К корпусным деталям ГТД, таким как корпуса направляющих аппаратов, камер сгорания, турбин, предъявляются высокие требования по точности, прочности, жесткости, износостойкости, минимальным деформациям при переменной температуре, герметичности, удобству сборки, разборки и технологичности изготовления. В то же время они должны иметь малую массу и, как следствие, быть тонкостенными. Корпусные детали ГТД из коррозионностойких, теплостойких легированных сталей, жаропрочных и титановых сплавов изготавливаются из поковок, профилированных кольцевых заготовок, листовых материалов и литьем. Их изготовление сопровождается большой трудоёмкостью и высоким расходом материала вследствие необходимости назначения больших припусков для обеспечения требуемого качества поверхности, напусков и технологических прибылей для механической обработки. Также дополнительный расход материала наблюдается при получении исходных заготовок (расход на литниково-питающую систему, облой).

Применение аддитивных технологий для изготовления тонкостенных крупногабаритных заготовок, в частности прямого лазерного выращивания (ПЛВ) на роботизированных установках, оправдано, поскольку данная технология позволяет получать заготовки, приближённые по форме к деталям. Несмотря на это, заготовки, получаемые по технологии ПЛВ, не удовлетворяют требованиям по размерной точности, вследствие чего необходимо предусматривать припуск (2 мм и более) на обрабатываемые поверхности заготовок. К одной из причин, приводящих к снижению размерной точности, относится несовершенство программного обеспечения (САМ-системы), с помощью которого формируются траектории наплавки, не учитывающего специфику процесса ПЛВ и кинематику роботизированной ячейки, а также ряд других проблем, требующих исследования.

Наиболее удачной компоновкой установок ПЛВ с точки зрения обеспечения выращивания крупногабаритных заготовок является компоновка, состоящая из шестиосевого робота, на котором установлен наплавочный инструмент, и двухосевого позиционера, на столе которого выращивается заготовка. При этом чем крупнее заготовка, тем больший вылет робота необходим для обеспечения выращивания. Это приводит к уменьшению точности позиционирования робота и, как следствие, уменьшению точности выращивания, что, на сегодняшний день, компенсируется увеличением припуска на обрабатываемые поверхности.

С точки зрения точности позиционирования оптимальным взаимным положением робота и позиционера является то, при котором робот имеет наименьший вылет относительно собственной базы. С учётом обеспечения инструментальной доступности и исключения сингулярных положений, рациональной рабочей зоной инструмента в данной компоновке будет являться пространство вблизи плоскости, перпендикулярной оси наклона позиционера. Однако такого позиционирования проблематично достичь из-за наличия большого количества подвижных осей, что приводит к появлению неконтролируемых паразитных движений во время наплавки. Это явление не только снижает точность получения заготовок, но и может привести к повреждению наплавочного инструмента и его компонентов.

На сегодняшний день эта проблема частично решается заданием ограничений движения по осям и присвоением приоритета движения для каждой оси в САМ-системе. Однако данный способ является трудоёмким из-за последовательного внесения правок и проведения многочисленных симуляций движения робота до достижения требуемого результата, а также низкоэффективным из-за того, что вышеописанная проблема может решиться не полностью. В связи с этим, представленная работа, направленная на разработку методики прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД, является актуальной.

Степень разработанности темы. Проведённый анализ работ, публикуемых в мире по данной проблематике, говорит об интересе исследователей к данной теме и её актуальности, так как всё чаще применяются аддитивные технологии для выращивания сложных изделий.

Вопросами использования аддитивных технологий в производстве сложнопрофильных заготовок авиационных ГТД занимались многие отечественные и зарубежные учёные: Г.А. Туричин, О.Г. Оспенникова, Л.А. Магеррамова, Д.Н. Трушников, Д.Ю. Колодяжный, Е.В. Земляков, К.Д. Бабкин, В.Г. Смелов, А.В. Балякин, А.В. Сотов, В.П. Алексеев, А.М. Вильданов, В.В. Исаков, И.С. Мазалов, О.М. Огородникова, А.В. Рипецкий, В.Г. Низьев, О.П. Решетникова, 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.

Вопросами создания управляющих программ для промышленных роботов в САМ-системах занимались учёные: Н. Конов, А.А. Ловыгин, С.Г. Серегин, М.А. Горькавый, П.А. Ведмидь, А.В. Сулинов и другие.

Обзор современного состояния САМ-систем применительно к технологии прямого лазерного выращивания показал недостаточную проработанность программного обеспечения и готовность к созданию полностью законченных управляющих программ для аддитивного производства.

Цель работы. Повышение коэффициента использования материала и сокращение трудоёмкости изготовления крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД по технологии прямого лазерного выращивания на роботизированных установках на основе разработки методики, обеспечивающей получение заготовок, близких по форме к готовым деталям, за счёт формирования рациональных траекторий наплавки.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ проблемы получения крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД с учётом назначения рационального припуска.

2. Разработать математическую модель формирования траекторий многоосевой наплавки для формообразования заготовок деталей ГТД по технологии прямого лазерного выращивания на роботизированных установках с использованием двухосевого позиционера.

3. Разработать средства технологической подготовки для создания управляющих программ для роботизированных установок прямого лазерного выращивания на базе математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД.

4. Выявить и систематизировать ограничения технологии прямого лазерного выращивания с целью их учёта при формировании траекторий многоосевой наплавки для роботизированных установок прямого лазерного выращивания и в интерфейсе пользователя САМ-систем.

5. Разработать методику прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД и апробировать её изготовлением крупногабаритной заготовки детали авиационного ГТД на роботизированной установке прямого лазерного выращивания.

Объект исследования. Технологические процессы производства крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей авиационных ГТД.

Предмет исследования. Крупногабаритные осесимметричные заготовки корпусных деталей авиационных ГТД, полученных по технологии прямого лазерного выращивания на специальном оборудовании для формообразования.

Научная новизна работы:

1. Разработана математическая модель формирования траекторий многоосевой наплавки для формообразования крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД по технологии прямого лазерного выращивания на роботизированных установках с использованием двухосевого позиционера, отличающаяся от известных решений возможностью формирования рациональных траекторий при выращивании элементов, близких по форме к осесимметричным.

2. Сформулированы ограничения технологии прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД с целью формирования траекторий многоосевой наплавки, отличающиеся от ранее известных систематизацией и адаптацией траекторий через предложенный интерфейс пользователя САМ-систем.

3. Разработана методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД, отличающаяся от известных аналогов использованием оригинального алгоритма многоуровневого выращивания для сокращения времени генерации управляющих программ и включающая в себя математическую модель формирования траекторий многоосевой наплавки.

Теоретическая значимость работы заключается в создании математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки по технологии ПЛВ для роботизированных установок с использованием двухосевого позиционера, учитывающей сохранение заданной ориентации инструмента в пространстве, а также обеспечение выращивания крупногабаритных заготовок деталей за счёт использования поворотной оси позиционера. Также теоретическая значимость заключается в создании алгоритма многоуровневого выращивания, за счёт которого происходит копирование траекторий слоя на последующие слои до определенного значения.

Практическая значимость работы

Практическая значимость заключается в создании траекторий, приспособленных под кинематику совместного движения промышленного робота и позиционера для выращивания крупногабаритных осесимметричных заготовок деталей ГТД, что, во-первых, повышает точность технологии прямого лазерного выращивания, а, во-вторых, обеспечивает технологу возможности задания технологических параметров для каждой траектории при создании управляющих программ. Использование алгоритма многоуровневого выращивания позволяет существенно снизить время генерации управляющих программ и, как следствие, трудоёмкость выращивания. Установлены технологические ограничения

роботизированной многоосевой наплавки по технологии ПЛВ для использования в интерфейсе пользователя САМ-систем для расчёта траекторий наплавки на роботизированных установках.

Содержание диссертации

Область исследования по содержанию, объекту и предмету 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» направлений исследований паспорта научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки).

Методы исследований

В работе использовались численные и экспериментальные методы исследования. Разработка и апробация математических моделей осуществлялись с использованием интегрированной среды разработки Spyder на языке Python.

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.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель формирования траекторий многоосевой наплавки для формообразования заготовок деталей ГТД по технологии прямого лазерного выращивания на роботизированных установках с использованием двухосевого позиционера.

2. Ограничения технологии прямого лазерного выращивания с целью их учёта при формировании траекторий многоосевой наплавки.

3. Методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД.

Обоснованность и достоверность работы

Обоснованность и достоверность выдвинутых в диссертации положений, сделанных выводов, предложенных рекомендаций и итоговых заключений обеспечиваются точностью применяемого лабораторного оборудования, позволяющего провести сравнение результатов экспериментов с численными и аналитическими расчётами. Результаты расчётных данных верифицированы проведенными экспериментами на поверенном оборудовании.

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.); III International Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education – ASedu-III 2022 (г. Красноярск, октябрь 2023 г.); Международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, июнь 2023 г., июнь 2025 г.); Всероссийском научно-техническом форуме по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова (г. Самара, октябрь 2024 г.).

Результаты диссертационной работы в виде методики прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД внедрены на ПАО «ОДК-Кузнецов» и АО «Самарские авиадвигатели», что подтверждается соответствующими актами внедрения. Разработано техническое задание на разработку модуля для аддитивного производства в САМ-системе и получен акт внедрения от ООО «Крона», разработчика CAD/CAM «ADEM». Материалы диссертационной работы нашли применение в учебном процессе Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

Связь с государственными программами и НИР

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSS-2024-0018).

Публикации

По теме диссертации 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 №2024620533.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 95 наименований. Общий объём диссертации составляет 132 страницы, 63 рисунка и 12 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается важность выбранной темы, рассматривается уровень её изученности, раскрывается научная новизна, теоретическое и прикладное значение. Описаны ключевые положения, предлагаемые для защиты, представлены сведения об апробации полученных результатов и публикациях по данной тематике.

В первой главе представлен анализ проблемы получения крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД с учётом назначения рационального припуска. Показано, что технология ПЛВ позволяет значительно уменьшить величину припуска на механическую обработку при изготовлении крупногабаритных осесимметричных корпусных заготовок по сравнению с традиционной технологией. Снижение расхода материала и сокращение времени производства происходит путём исключения из технологического процесса (ТП) черновых механических операций за счёт получения заготовок, близких по форме к готовым деталям.

Обзор публикаций позволил выявить проблемы обеспечения точности изготовления крупногабаритных заготовок корпусных деталей. Установлено, что существующие средства технологической подготовки не приспособлены для технологии ПЛВ на роботизированных установках. К основным проблемам относятся отсутствие учёта технологических параметров ПЛВ, а также несогласованность движений роботизированной ячейки при многоосевой наплавке. На основании проведённого обзора сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки для формообразования крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД по технологии ПЛВ на роботизированных установках с использованием двухосевого позиционера, обеспечивающей формирование адаптированных траекторий при выращивании элементов заготовок деталей ГТД, близких по форме к осесимметричным.

Данная математическая модель позволяет адаптировать траектории наплавки под роботизированные установки, оснащённые двухосевым позиционером, и преобразовать исходные траектории, представленные набором координат положения рабочей точки инструмента (РТИ) формата (x, y, z, W, P, R) в новый расширенный формат (x, y, z, W, P, R, B, C) , где x, y, z – координаты РТИ, W, P, R – ориентация инструмента в виде углов поворота инструмента вокруг осей X, Y, Z соответственно, B, C – углы наклона и поворота позиционера. Из-за наличия избыточных степеней свободы в системе, состоящей из шестиосевого робота и двухосевого позиционера, возникает неопределённость положения её элементов. Адаптивное траекторий устраняет данную проблему путём учёта дополнительных степеней свободы системы, а именно углов наклона и поворота позиционера.

Основная идея модели состоит в том, что движение по траектории из начального положения РТИ X_0 в конечное положение X_1 раскладывается на две составляющие: прямолинейное движение из X_0 в промежуточное положение X_{01} за счёт движения робота и движение по дуге окружности из X_1 в X_{01} за счёт поворота позиционера на угол C (рисунок 1).

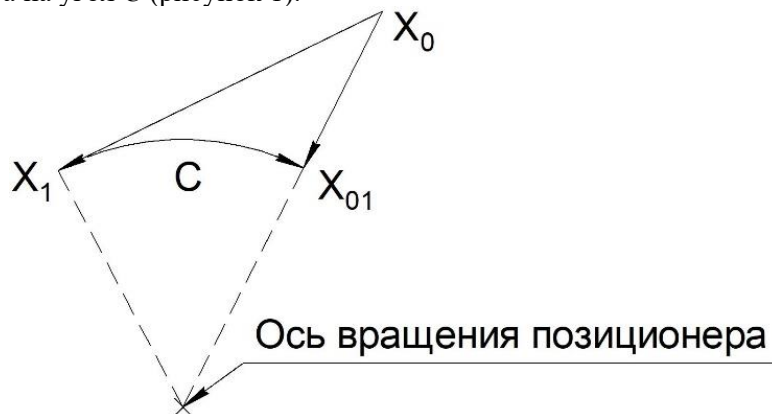


Рисунок 1 – Схема движения с учётом предлагаемого алгоритма

При расчёте положений РТИ в точках X_0 и X_1 они представляются в матричном виде:

$$X_0 = \begin{bmatrix} \cos P_0 \cos R_0 & \sin W_0 \sin P_0 \cos R_0 - \cos W_0 \sin R_0 & \cos W_0 \sin P_0 \cos R_0 - \sin W_0 \sin R_0 & x_0 \\ \cos P_0 \sin R_0 & \sin W_0 \sin P_0 \sin R_0 + \cos W_0 \cos R_0 & \cos W_0 \sin P_0 \cos R_0 - \sin W_0 \cos R_0 & y_0 \\ -\sin R_0 & \sin W_0 \cos P_0 & \cos W_0 \cos P_0 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$X_1 = \begin{bmatrix} \cos P_1 \cos R_1 & \sin W_1 \sin P_1 \cos R_1 - \cos W_1 \sin R_1 & \cos W_1 \sin P_1 \cos R_1 - \sin W_1 \sin R_1 & x_1 \\ \cos P_1 \sin R_1 & \sin W_1 \sin P_1 \sin R_1 + \cos W_1 \cos R_1 & \cos W_1 \sin P_1 \sin R_1 - \sin W_1 \cos R_1 & y_1 \\ -\sin R_1 & \sin W_1 \cos P_1 & \cos W_1 \cos P_1 & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1$ – декартовы координаты рабочей точки инструмента, $W_0, P_0, R_0, W_1, P_1, R_1$ – ориентация инструмента в виде углов поворота инструмента вокруг осей X, Y, Z соответственно.

Математическая модель формирования траекторий многоосевой наплавки реализована в виде следующей последовательности:

1. Определяется угол B_1 наклона оси позиционера в точке X_1 :

$$B_1 = -\arctg \frac{\sqrt{(\cos W_1 \sin P_1 \cos R_1 - \sin W_1 \sin R_1)^2 + (\cos W_1 \sin P_1 \cos R_1 - \sin W_1 \cos R_1)^2}}{\cos W_1 \cos P_1}. \quad (3)$$

2. Координаты точки X_1 из системы координат заготовки (CK_3) переводятся в систему координат позиционера (CK_{II}) при наклоне позиционера на угол B_1 :

$$(X_B)_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos B_1 & \sin B_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_{BB} \\ -\sin B_1 & \cos B_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos B_1 & \sin B_1 & 0 & 0 \\ -\sin B_1 & \cos B_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -a_B \\ 0 & 0 & 1 & -d_B \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot X_1, \quad (4)$$

где d_c – расстояние от системы координат позиционера до системы координат заготовки, измеренное вдоль оси Z , d_{BB} – расстояние от системы координат позиционера до системы координат заготовки, измеренное вдоль оси X , a_B – расстояние от системы координат позиционера до системы координат заготовки, измеренное вдоль оси Y , d_B – расстояние от системы координат позиционера до точки X_1 , измеренное вдоль оси Z (рисунок 2).

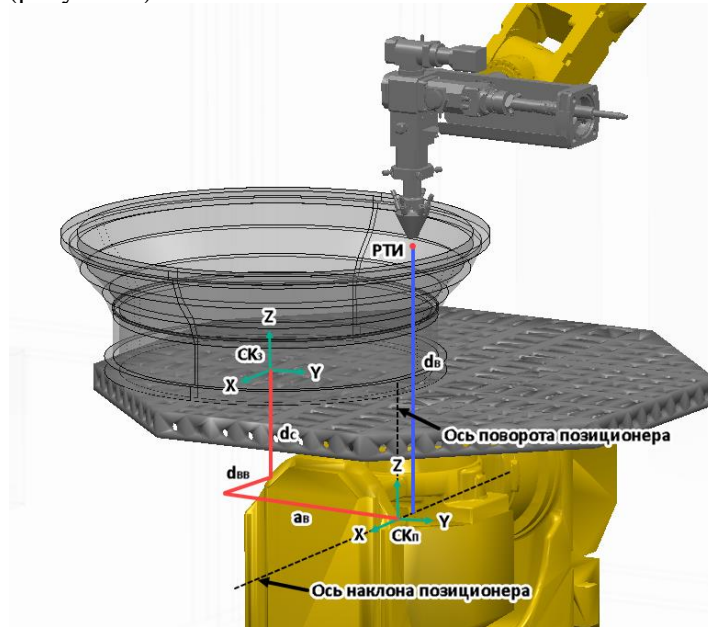


Рисунок 2 – Плечи для перехода в систему координат позиционера

3. Определяются возможные радиусы поворота позиционера относительно оси Z в системе координат позиционера:

$$R_{Z1} = \sqrt{x_{1B}^2 + y_{1B}^2}, \quad (5)$$

где x_{1B}, y_{1B} – координаты рабочей точки инструмента после наклона позиционера на угол B_1 . Аналогично вычисляется радиус поворота R_{Z0} для точки X_0 .

4. Определяется возможность поворота позиционера на угол C_1 .

Для этой цели рассматриваются погрешности, связанные с возможным поворотом позиционера. Первая погрешность появляется при замене линейной интерполяции на объединённую круговую и линейную. Рисунок 3 наглядно иллюстрирует такой подход. Требуемое движение по вектору 1 можно разложить на элементарные перемещения по векторам 2 и 3, где вектор 2 направлен вдоль хорды дуги 4, образованной при относительном повороте позиционера на угол δ_C . Если применить совместное движение

позиционера и робота, т.е. заменить вектор 2 дугой 4, то такая замена приведет к появлению максимальной погрешности δ_0 .

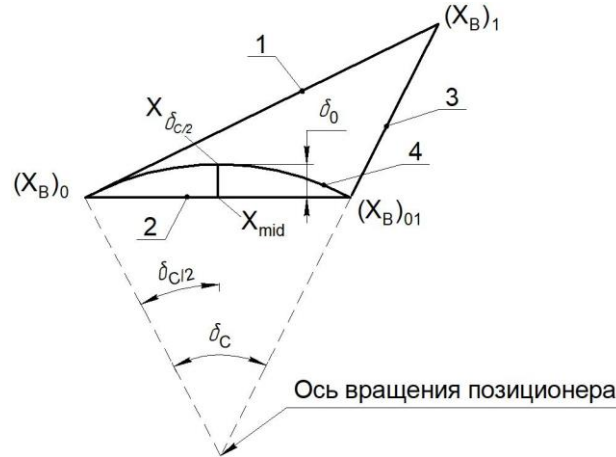


Рисунок 3 – Иллюстрация появления погрешности

Тогда погрешность отклонения от линейной интерполяции будет рассчитываться по зависимости

$$\delta_0 = \sqrt{(X_{\delta_{C/2}} - X_{mid})^T (X_{\delta_{C/2}} - X_{mid})}. \quad (6)$$

Вторая погрешность также ограничивает возможность замены линейной интерполяции на сумму круговой и линейной интерполяций. Для этого вычисляется относительная погрешность приращения радиусов возможного поворота δ_1 и сравнивается с заданной точностью $(\delta_1)_{допустимое}$:

$$\delta_1 = \left| 1 - \frac{R_{Z0}}{R_{Z1}} \right| \leq (\delta_1)_{допустимое}. \quad (7)$$

Помимо погрешностей, значения которых ограничивают возможность поворота позиционера, существует кинематическое ограничение поворотной оси позиционера. Оно заключается в невозможности обеспечения требуемой скорости наплавки в точках, близких к оси вращения позиционера. Критический радиус, при котором позиционер может обеспечить заданную скорость, определяется по формуле

$$R_{крит} = \frac{v_p}{\omega_{\pi}}, \quad (8)$$

где v_p – рабочая скорость, мм/с, ω_{π} – максимальная угловая скорость поворотной оси позиционера, град/с.

В результате, если условие

$$(\delta_0 \leq (\delta_0)_{допустимое}) \wedge (\delta_1 \leq (\delta_1)_{допустимое}) \wedge (R_{Z1} \geq R_{крит}) = 1 \quad (9)$$

выполняется, то поворот позиционера становится возможным.

5. Вычисляется возможный угол поворота позиционера.

$$C_1 = \arctg \frac{\cos W_1 \sin P_1 \cos R_1 - \sin W_1 \cos R_1}{\cos W_1 \sin P_1 \cos R_1 - \sin W_1 \sin R_1}. \quad (10)$$

6. Если поворот позиционера возможен, то после поворота координаты рабочей точки $(X_C)_1$ в системе координат позиционера рассчитываются по зависимости (11):

$$(X_C)_1 = \begin{bmatrix} \cos C_1 & -\sin C_1 & 0 & 0 \\ \sin C_1 & \cos C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot (X_B)_1. \quad (11)$$

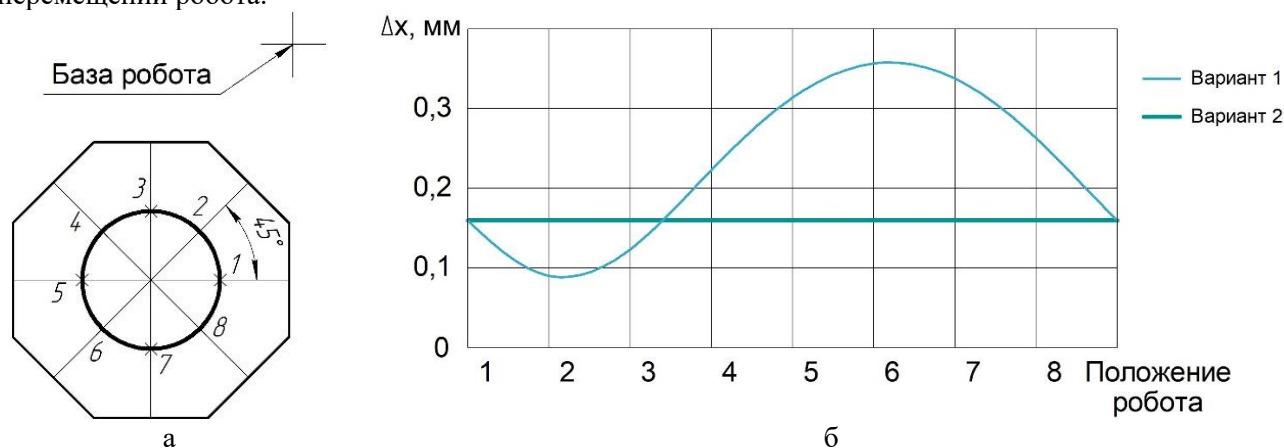
7. Производится пересчет координат рабочей точки $(X_C)_1$ из системы координат позиционера в систему координат заготовки по зависимости (12):

$$X_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_B \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_{BB} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot (X_C)_1. \quad (12)$$

8. Полученные координаты X_{01} (x_{01} , y_{01} , z_{01} , W_{01} , P_{01} , R_{01}) вместе с углами B_1 и C_1 выводятся в выходной файл.

Таким образом, во второй главе разработана математическая модель формирования траекторий многоосевой наплавки, в которой реализуется адаптированная модификация управляющей программы. В соответствии с этой математической моделью для каждой пары точек траектории наплавочного инструмента роботизированной установки определяется возможность изменения исходной траектории в сторону уменьшения перемещений за счёт поворота позиционера без изменения заданной траектории наплавки в пределах, определяемых ограничениями (7) и (8).

Апробация математической модели осуществлялась при моделировании движения по овалу с диаметром большой оси 500 мм и овальностью 5% с центром, совпадающим с поворотной осью позиционера (рисунок 4а). В первом случае движение осуществлялось за счёт робота, а во втором случае за счёт позиционера и робота с применением разработанной модели. На рисунке 4б показана зависимость точности позиционирования робота Δx от его положения для двух вариантов движения, откуда видно, что в первом варианте из-за изменения вылета робота его точность позиционирования принимает максимальное значение 0,36 мм, в то время как во втором варианте точность позиционирования составляет около 0,16 мм, поскольку движение осуществляется за счёт позиционера и небольших перемещений робота.



а – схема движения, б – зависимость точности позиционирования робота от его положения
Рисунок 4 – Определение точности позиционирования

На рисунке 5 показана зависимость точности позиционирования робота Δx от диаметра D большой оси овала для двух вариантов движения. Из графика следует, что точность при использовании разработанной модели повышается при выращивании наиболее удалённых от оси позиционера элементов заготовок деталей. В этом случае точность позиционирования возросла на 70% и составила 0,14 мм.

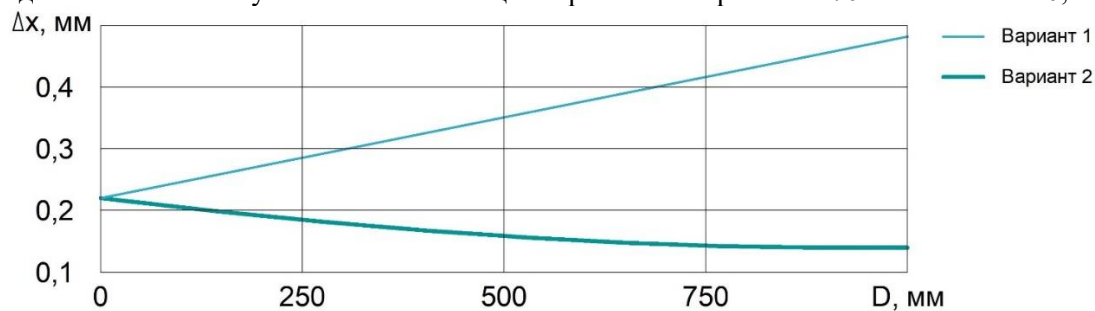


Рисунок 5 – Зависимость точности позиционирования робота от диаметра осесимметричной траектории

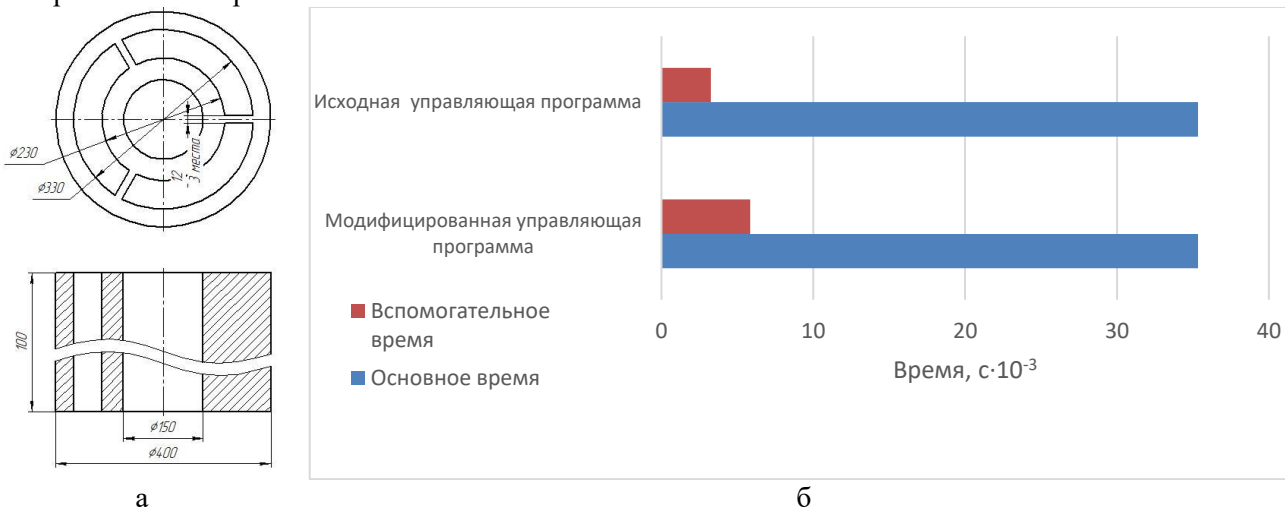
Третья глава посвящена разработке средств технологической подготовки для создания управляющих программ для роботизированных установок прямого лазерного выращивания на базе математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки крупногабаритных деталей авиационных ГТД.

Данные средства позволяют получать управляющие программы с траекториями, адаптированными под роботизированные установки ПЛВ, и представляют собой приложение для конвертации исходных траекторий, которые пересчитываются согласно математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки. Кроме этого, оно позволяет получать для каждой точки траектории значения углов поворота звеньев робота и позиционера для симуляции движений роботизированной установки в САМ-системе, что является необходимым этапом технологической подготовки.

Приложение базируется на решении обратной задачи кинематики. Для её решения из значений координат РТИ определяются углы поворота звеньев робота. При этом решение обратной задачи кинематики производится с учётом динамики робота. Структурно средства технологической подготовки для создания управляющих программ для роботизированных установок прямого лазерного выращивания работают по следующему алгоритму:

1. Из файла CLData берётся информация о положении РТИ в текущей $X_0(x_0, y_0, z_0, W_0, P_0, R_0)$ и в следующей $X_1(x_1, y_1, z_1, W_1, P_1, R_1)$ точках траектории движения инструмента.
2. На основании значений в X_0 и X_{01} определяется положение РТИ в точке X_{01} и углы поворота и наклона позиционера B_1 и C_1 с использованием математической модели, описанной во второй главе.
3. Решается обратная задача кинематики и определяются углы поворота звеньев робота $(q_1, \dots, q_6)$.
4. Повторяются пункты 1-3 для всех точек траекторий.
5. Формируется новый файл CLData с пересчитанными точками траекторий в формате $(x_{01}, y_{01}, z_{01}, W_{01}, P_{01}, R_{01}, B_1, C_1)$.
6. Формируется файл симуляции траекторий в формате $(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, B_1, C_1)$.

Для апробации средств технологической подготовки была выращена заготовка, эскиз которой представлен на рисунке 6а. На рисунке 6б показано сравнение времени выращивания по исходной управляющей программе и с использованием средств технологической подготовки для создания управляющих программ, откуда видно, что применение математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки позволяет повысить эффективность процесса выращивания с точки зрения уменьшения вспомогательных движений и исключения паразитных движений. В этом случае время выращивания уменьшилось с 41055 с до 38491 с, то есть на 7%. При этом, из-за непрерывной подачи порошка и технических газов (аргона) при выращивании, сокращение времени позволило сэкономить 1 кг порошка и 1 м³ аргона.



а – эскиз заготовки, б – сравнение времени выращивания
Рисунок 6 – Апробация средств технологической подготовки

В четвёртой главе описываются ограничения технологии прямого лазерного выращивания для их учёта при формировании траекторий многоосевой наплавки через предложенный интерфейс пользователя САМ-систем.

Для получения годных заготовок по технологии ПЛВ требуется учёт различных факторов, которые могут повлечь за собой отклонение режимов выращивания от заданных, что и определяет ограничения технологии прямого лазерного выращивания (таблица 1). Анализ природы этих проблем позволил систематизировать и распределить их по группам и предложить рекомендации по их решению. Влияние технологических ограничений ПЛВ можно учесть на этапе технологической подготовки, а именно, при создании управляющих программ в САМ-системе. Однако множество отечественных и зарубежных САМ-систем мало приспособлены для аддитивного производства, в частности, для технологии ПЛВ, и не учитывают особенности технологии. Поэтому предлагается разработать модель генерации управляющих программ при многоосевой наплавке для роботизированных установок ПЛВ с учётом технологических ограничений и внедрить её в отечественную САМ-систему «АДЕМ».

Таблица 1 – Технологические ограничения ПЛВ

Технологические ограничения	Описание	Рекомендация
<i>Ограничения, связанные с процессом ПЛВ</i>		
Недостаточная адгезия с платформой построения	Заготовку отрывает от платформы построения в процессе выращивания	Применять приплавочные слои
Волнистость слоя	Слой имеет неправильную форму: крайние валики не достигают заданной высоты по сравнению с центральными валиками	Назначить отдельные массовые расходы порошка на каждую группу валиков
Волнистость валика	На замкнутых траекториях при выращивании появляется «провал»; на незамкнутых искажается начало и конец траектории	Разделять точки начала траекторий по высоте; чередовать направление траекторий
Коробление тонкой стенки заготовки	Заготовка претерпевает деформацию в процессе выращивания	Использовать ребра жёсткости и стрингеры
Нестабильность выращивания	Процесс выращивания происходит нестабильно: наплавочный инструмент отдаляется и/или приближается к зоне выращивания	Изменить технологические режимы выращивания
<i>Ограничения, связанные с геометрией заготовки</i>		
Наличие нависающих элементов	Ограничения с созданием нависающих элементов	Использовать позиционер, в качестве опорных поверхностей использовать наплавленные элементы
Наличие радиальных отверстий	Верхнюю часть радиальных отверстий невозможно получить без поддерживающих структур	Использовать каплевидную форму отверстий
<i>Ограничения, связанные с кинематикой роботизированной ячейки</i>		
Несоосность наклонных стенок с вертикальными	На переходе между цилиндрическими и наклонными стенками имеется ступенька	Скорректировать положение РТИ, использовать математическую модель формирования траекторий многоосевой наплавки
Неосесимметричная форма заготовки	Выращенная заготовка имеет овальную форму	Скорректировать положение скоординированной пары, использовать математическую модель формирования траекторий многоосевой наплавки

Структурно модель разделяется на два блока: блок технологических параметров и блок генерации траектории (рисунок 7). К первому блоку относится набор данных, которые определяют параметры режимов выращивания: скорости ходов, величины подачи порошкового материала и расхода технического газа. Ко второму блоку относится кинематика роботизированной установки ПЛВ – совместная работа робота и позиционера, траектории движения рабочего инструмента (подводы, рабочие ходы, отводы и переходы). Оба этих блока учитывают технологические ограничения прямого лазерного выращивания. Например, для корректного формирования толстой стенки (3 валика и более) применяются чередование направления траекторий и разделение валиков на группы. На основании этого предлагается модель формирования слоя, учитывающая технологические ограничения (рисунок 8).

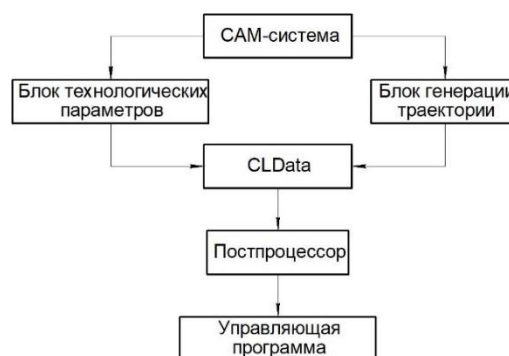


Рисунок 7 – Блок-схема генерации управляющей программы

Для создания управляющих программ для многоосевой наплавки необходимо программное обеспечение, в котором имеется возможность работы с роботизированными ячейками. При этом оно должно поддерживать аддитивный профиль, позволяющий создавать управляющие программы для аддитивных процессов. В САМ-системах создание выращиваемого элемента состоит из двух частей: в первой части определяются границы выращиваемого элемента, а во второй определяется опорная поверхность, от которой происходит выращивание элемента. Исходя из этого, появляется необходимость разделения заготовки на зоны, отличающихся друг от друга направлением выращивания. Позиционер позволяет обеспечить доступ рабочего инструмента к области, где выращивается нависающий элемент, а

также даёт возможность вертикальной ориентации инструмента, тем самым обеспечивая благоприятные условия выращивания. Модель генерации управляющих программ с учётом использования позиционера показана на рисунке 9.

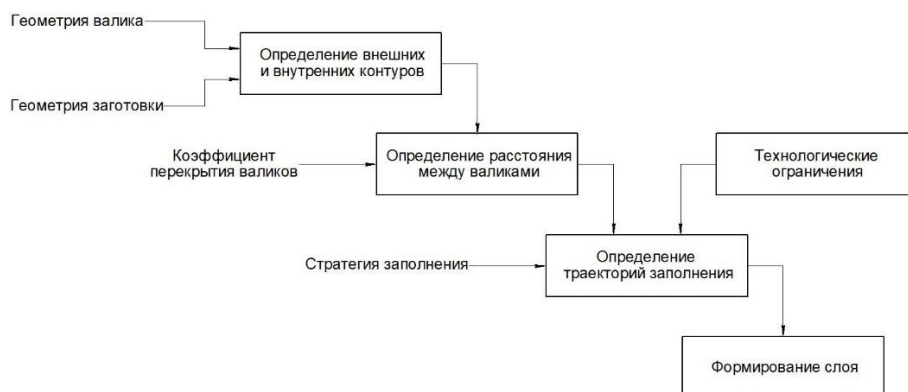


Рисунок 8 – Схема формирования слоя с учётом технологических ограничений



Рисунок 9 – Схема генерации управляющей программы с учётом использования позиционера

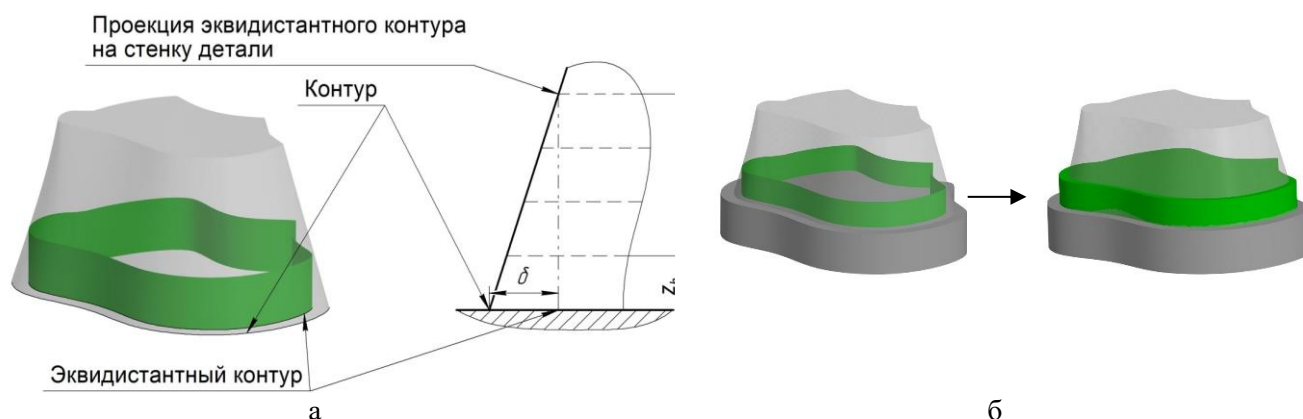
Выявленные и систематизированные ограничения технологии прямого лазерного выращивания в составе вышеописанных схем учитывались при формировании технического задания на разработку модуля для аддитивного производства в САМ-системе «ADEM», которое подтверждается актом внедрения.

В пятой главе описывается методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД и её апробация изготовлением крупногабаритной заготовки детали ГТД на роботизированной установке прямого лазерного выращивания.

Так как элементы крупногабаритных осесимметричных корпусных заготовок деталей ГТД имеют, как правило, форму полого цилиндра или близкую к ней, то рационально представить траектории каждого слоя не отдельными элементами, для которых требуется индивидуальная генерация точек, а в качестве массива, состоящего из базового слоя и копируемых слоёв. В этом случае достаточно сгенерировать траектории базового слоя и повторять их до достижения определённой высоты в виде циклов. Оригинальный алгоритм многоуровневого выращивания состоит из следующих пунктов:

1. На текущем уровне построения по высоте определяется внешний контур детали L_i и контуры внутренних островов.
2. Строится эквидистантный контур, расположенный внутри внешнего контура и отстающий от него на величину δ , которая определяет точность многоуровневого выращивания.
3. Эквидистантный контур проецируется на стенки детали $Z = f(x, y)$, где x, y – координаты эквидистантного контура (рисунок 10а).
4. Определяется минимальная высота проекции эквидистантного контура $Z_{\min} = \min f(x, y)$.
5. Рассчитывается заполнение исходного контура L_i – формируется траектория T_p движения наплавочного инструмента в слое.
6. Траектория T_p копируется без изменений на высоту $Z_{\min}$ с шагом построения Z_h в виде цикла или подпрограммы $(Z_{\min}/Z_h)$ раз на высотах от $Z_{\text{исходная}}$ до $(Z_{\text{исходная}} + Z_{\min})$ включительно.

7. На высоте, соответствующей $Z_{\min}$, определяются новые внешние контуры L_{i+1} и контуры внутренних островов путем сечения детали плоскостью $Z = (Z_{\text{исходная}} + Z_{\min})$.
8. Повторяются пункты 2-6 (рисунок 10б).



а – схема многоуровневого выращивания, б – последующее выращивание уровней
Рисунок 10 – Схема многоуровневого выращивания

Применение данного алгоритма особенно эффективно на начальных этапах выращивания заготовки, когда формируется компенсационный слой, имеющий, как правило, самую массивную часть заготовки и представляющий собой призму или цилиндр с вертикальными боковыми гранями.

Суммируя вышесказанное, методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД, включающая оригинальный алгоритм многоуровневого выращивания, состоит из следующих пунктов:

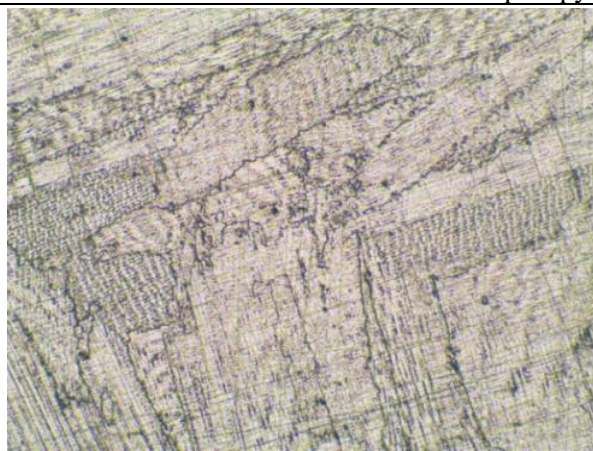
1. Из файла CLData берётся информация о положении точек X_0 и X_1 траектории движения инструмента.
2. Определяется угол B_1 наклона оси позиционера в точке X_1 .
3. Координаты точки X_1 из системы координат заготовки переводятся в систему координат позиционера при наклоне позиционера на угол B_1 .
4. Определяются возможные радиусы поворота позиционера относительно оси Z в системе координат позиционера.
5. Определяется возможность поворота позиционера на угол C_1 .
6. Вычисляется возможный угол поворота позиционера.
7. Если поворот позиционера возможен, то после поворота рассчитываются координаты рабочей точки $(X_C)_1$ в системе координат позиционера.
8. Производится пересчёт координат рабочей точки $(X_C)_1$ из системы координат позиционера в систему координат заготовки.
9. Полученные координаты $X_{01}(x_{01}, y_{01}, z_{01}, W_{01}, P_{01}, R_{01})$ вместе с углами B_1 и C_1 выводятся в выходной файл.
10. Исходя из значений $x_{01}, y_{01}, z_{01}, W_{01}, P_{01}, R_{01}, B_1$ и C_1 , решается обратная задача кинематики и определяются углы поворота звеньев робота ($q_1, \dots, q_6$) и позиционера (B_1, C_1).
11. Повторяются пункты 1-10 для всех точек траекторий.
12. Применяется алгоритм многоуровневого выращивания для снижения объёма управляющей программы.
13. Формируется управляющая программа согласно схеме генерации управляющей программы с учётом использования позиционера.

Таким образом, методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД отличается от известных решений:

- применением математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки, позволяющей адаптировать исходные траектории движения инструмента под роботизированные установки прямого лазерного выращивания;
- применением средств технологической подготовки, позволяющей получать управляющие программы для роботизированных установок ПЛВ, а также значения углов поворота звеньев робота и позиционера для симуляции движений роботизированной установки в САМ-системе;
- применением алгоритма многоуровневого выращивания, позволяющей снизить как объём управляющей программы, так и время её генерации, что снижает время технологической подготовки и, тем самым, трудоёмкость изготовления.

Для предварительной апробации методики были выращены технологические пробы для исследования микроструктуры и геометрической точности с использованием методики и без неё. Технологические пробы представляют собой параллелепипеды с размерами 50×11×15 мм. Возможными характерными дефектами проб могут быть несплавления между валиками, а также отклонения геометрических размеров технологических проб как в ширину, так и в высоту. При сравнении макро- и микроструктуры технологических проб указанные выше дефекты не были обнаружены (таблица 2).

Таблица 2 – Макро- и микроструктура технологических проб

Без методики		С использованием методики	
Макроструктура			
			
Микроструктура, 166 крат			
			

Для заключительной апробации методики была выращена крупногабаритная заготовка детали авиационного ГТД на роботизированной установке ПЛВ. На рисунке 11 показана выращенная заготовка детали «Кольцо наружное ВНА». Время выращивания составило 16 часов, масса заготовки – 13,7 кг, затрачено 21,7 кг металлпорошковой композиции ВЖ159. Высокий расход порошка связан с большим количеством холостых ходов, во время которых подача порошка не прекращалась. Больше всего холостых ходов было при выращивании 20-ти бобышек.



Рисунок 11 – Выращенная заготовка детали «Кольцо наружное ВНА»

В таблице 3 представлено сравнение вариантов изготовления детали «Кольцо наружное ВНА» по традиционному технологическому процессу и по технологии ПЛВ без методики и с её использованием.

Таблица 3 – Сравнение вариантов изготовления детали «Кольцо наружное ВНА»

	Традиционный ТП	ТП ПЛВ без методики	ТП ПЛВ с методикой
Масса заготовки, кг	31,9	14,2	13,7
Трудоёмкость изготовления, н-ч	346,1	157,3	149,3
КИМ	0,19	0,44	0,45

Из таблицы видно, что применение технологии ПЛВ позволило снизить массу заготовки и трудоёмкость изготовления более чем в 2 раза, а применение разработанной методики позволило дополнительно сэкономить 4% материала по сравнению с внедряемым в производство ТП ПЛВ за счёт повышения точности позиционирования, что дало возможность уменьшить припуск на обработку. Также методика обеспечила снижение трудоёмкости технологической подготовки за счёт:

- сокращения числа симуляций до 1 итерации, что позволило сэкономить 8 н-ч по сравнению с ТП ПЛВ без методики;
- снижения времени генерации УП;
- снижения времени вспомогательных ходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено решение актуальной научно-технической задачи в области авиационного двигателестроения, направленное на повышение коэффициента использования материала и сокращение трудоёмкости при производстве ГТД за счёт разработки методики изготовления крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей авиационных ГТД по технологии прямого лазерного выращивания.

1. Выполнен анализ проблемы получения крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД с учётом назначения рационального припуска. Традиционной технологией получения крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД является сборка раскатных колец, процесс получения которых сопровождается высокой трудоёмкостью и большим расходом материала ввиду большого количества напусков. Технология ПЛВ позволяет снизить трудоёмкость изготовления крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД и повысить коэффициент использования материала за счёт снижения величины припуска и возможности получения формы заготовки, приближенной к форме детали. Установлено, что при замене традиционной технологии на технологию ПЛВ экономия материала возрастает в 1,2-3 раза.

2. Разработана математическая модель формирования траекторий многоосевой наплавки для формообразования заготовок деталей ГТД по технологии прямого лазерного выращивания на роботизированных установках с использованием двухосевого позиционера, позволяющая повысить точность позиционирования наплавочного инструмента. Проведённые эксперименты показали, что точность позиционирования при использовании модели составляет 0,14 мм, что на 70% точнее исходного способа позиционирования.

3. Разработаны средства технологической подготовки для создания управляющих программ для роботизированных установок прямого лазерного выращивания на базе математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки крупногабаритных деталей авиационных ГТД. Средства технологической подготовки позволяют получать управляющие программы с возможностью формирования траекторий, адаптированных под многоосевую наплавку крупногабаритных заготовок, и значения углов поворота звеньев робота и позиционера для симуляции движений в САМ-системе.

4. Сформулированы ограничения технологии прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД, позволяющие учитывать их при формировании траекторий многоосевой наплавки для роботизированных установок прямого лазерного выращивания. Ограничения, а также модели формирования слоёв и генерации управляющих программ адаптированы под их использование в САМ-системах. Разработано техническое задание и получен акт внедрения от ООО «Крона», разработчика CAD/CAM «ADEM».

5. Разработана методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД, включающая оригинальный алгоритм многоуровневого выращивания, позволяющий снизить время генерации управляющих программ. Апробация алгоритма при выращивании заготовки

детали «Кольцо наружное ВНА» показала, что время генерации сократилось на 84,8% и составило 89 секунд.

6. Достигнута цель диссертационного исследования и решена важная отраслевая проблема повышения коэффициента использования материала и сокращения трудоёмкости изготовления крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД по технологии прямого лазерного выращивания на роботизированных установках на основе разработки методики, обеспечивающей получение заготовок, близких по форме к готовым деталям, за счёт формирования рациональных траекторий наплавки. Разработанная методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД позволила сократить массу заготовки детали «Кольцо наружное ВНА» на 43% по сравнению с традиционным способом получения заготовки, состоящее из сборки двух отдельных кольцевых заготовок. Трудоёмкость получения детали сократилась более чем в 2 раза и составила 149,3 н-ч.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Перспективным направлением является совершенствование управления параметрами качества заготовок, получаемых с помощью технологии прямого лазерного выращивания, с целью повышения стабильности технологического процесса изготовления деталей ГТД. В частности, в будущих работах планируется разработка системы автоматического управления технологическими параметрами в процессе прямого лазерного выращивания.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Хаймович А.И., Балякин А.В., Олейник М.А. и др. Расчёт компенсации коробления от действия остаточных напряжений в аддитивном производстве // Вестник Московского авиационного института. — 2024. — Т. 31. № 1. — С. 215-225.
2. Балякин А.В., Олейник М.А., Злобин Е.П. и др. Обзор гибридного аддитивного производства металлических деталей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2022. — Т. 21. № 2. — С. 48-64.
3. Олейник М.А., Балякин А.В., Скуратов Д.Л. и др. Влияние режимов прямого лазерного выращивания на формообразование одиночных валиков и стенок из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ // Вестник Московского авиационного института. — 2022. — Т. 29. № 4. — С. 243-255.
4. Олейник М.А., Хаймович А.И., Балякин А.В. и др. Математическая модель кинематики промышленного робота, оснащенного двухосевым позиционером // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2021. — Т. 25. № 1. — С. 77-84.
5. Балякин А.В., Скуратов Д. Л., Олейник М.А. и др. Применение прямого лазерного сплавления металлических порошков из жаропрочных сплавов в двигателестроении // Вестник Московского авиационного института. — 2021. — Т. 28. № 3. — С. 202-217.

Статьи в изданиях, индексируемых базой данных Scopus

1. Khaimovich A., Nosova E., Oleynik M. etc. Study of Variability Phenomena in Direct Energy Deposition of Nickel-Based Superalloy on Geometric Accuracy and Residual Stress Formation // Materials Science Forum 2024. — Vol. 1139. — P. 21-30.
2. Oleynik M., Khaimovich A. and Balyakin A. 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.
3. Nosova E.A., Balyakin A.V., Oleynik M.A. Effect of Annealing on the Microstructure and Hardness of EP648 Alloy after Direct Metal Deposition // Physics of the Solid State 2023. — Vol. 65. Issue 1. № 1. — P. 32-35.
4. Oleynik M., Balyakin A., Khaimovich A., etc. 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. Vol. 458. — Voronezh: EDP Sciences, 2023. — P. 02023.

Подписано в печать 17.10.2025 г.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Усл. п.л. 1,0. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета: 443086, г. Самара.