

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук Колодяжного Дмитрия Юрьевича
на диссертационную работу Олейника Максима Андреевича на тему: «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.

Корпусные детали газотурбинных двигателей (ГТД) предъявляют строгие требования по размерной точности, прочности, жёсткости, износостойкости, минимальным температурным деформациям, герметичности, удобству сборки и разборки, а также технологичности. В то же время они должны обладать минимальной массой, что обуславливает необходимость тонкостенной конструкции. Изготовление таких деталей осуществляется из коррозионностойких, теплостойких легированных сталей, жаропрочных и титановых сплавов методами поковки, профилированных кольцевых заготовок, листовой штамповки и литья.

Традиционные технологии характеризуются высокой трудозатратностью и значительным расходом материала из-за необходимости применения больших припусков, напусков, технологических прибылей, а также потерь на литниково-питающую систему и облой. Использование аддитивных технологий, в частности прямого лазерного выращивания (ПЛВ) на роботизированных комплексах, оправдано для изготовления тонкостенных крупногабаритных заготовок, обеспечивая геометрическую близость к конечным изделиям.

Тем не менее, заготовки, полученные по технологии ПЛВ, не соответствуют требованиям по размерной точности, что требует использования припусков свыше 2 мм. Основной причиной этого является несовершенство систем автоматического моделирования и управления (САМ-системы), которые не учитывают особенности

Входящий № 206-10504
Дата 28 НОЯ 2025
Самарский университет

ПЛВ и кинематику роботизированной ячейки, компоновка которой включает шестиосевой робот с наплавочным инструментом и двухосевой позиционер.

Увеличение габаритов заготовки ведет к увеличению вылета робота, что снижает точность позиционирования и процесса наплавки; для компенсации этого используют соответствующие припуски.

Для обеспечения максимальной точности позиционирования промышленного робота в составе роботизированной установки ПЛВ при выращивании крупногабаритных заготовок деталей необходимо минимизировать вылет манипулятора относительно его базы с целью снижения влияния упругих деформаций кинематической цепи и погрешностей, обусловленных конечной жёсткостью звеньев, на размерную точность заготовки. Существующие подходы к поддержанию данного условия работы робота основаны на ручном определении жёстких ограничений диапазонов перемещений и приоритетов движений отдельных осей в САМ-системах. Эти методы требуют многократных итераций корректировки управляющих программ и обязательного проведения ресурсоёмких виртуальных симуляций траекторий, что затрудняет процесс оптимизации и снижает его эффективность.

Актуальность диссертация Олейника М.А. обусловлена тем, что она направлена на разработку подходов, которые позволяют повысить точность изготовления заготовок крупногабаритных корпусных деталей ГТД, снизить трудозатраты на разработку и корректировку управляющих программ и способствуют обеспечению более стабильного и точного выполнения технологических процессов. В результате это повышается качество продукции, снижаются время и затраты на подготовку оборудования, а также обеспечивается конкурентоспособность производственных решений в условиях современного производства ГТД.

Содержание работы. В диссертации Олейником М.А. предложена методика прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей

для авиационных газотурбинных двигателей с использованием аддитивной технологии прямого лазерного выращивания. Эта методика позволяет разрабатывать и производить крупногабаритные заготовки для горячей части авиационного двигателя или энергетической установки, обеспечивая при этом необходимые характеристики материала.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 95 наименований и одного приложения. Общий объём диссертации составляет 132 страницы, содержит 63 рисунка и 12 таблиц.

- *Во введении* обоснована актуальность выбранного направления исследований, сформулирована цель и задачи. Отмечены научная новизна и практическая значимость работы. Приведены положения, выносимые на защиту, и другая требуемая информация.

- *В первой главе* изложены результаты анализа проблемы рационального назначения припусков при производстве крупногабаритных осесимметричных заготовок корпусных деталей ГТД. Установлено, что технология ПЛВ обладает значительным потенциалом для минимизации припусков на механическую обработку, поскольку позволяет получать заготовки, форма которых близка к чистой геометрии детали. Это, в свою очередь, обуславливает сокращение расхода материала и продолжительности производственного цикла. Обзор публикаций выявил наличие существенных затруднений в обеспечении точности изготовления заготовок подобного класса. Критическим фактором является неготовность существующих систем технологической подготовки к внедрению роботизированных установок ПЛВ. Ключевыми нерешёнными вопросами признаны: необходимость учёта комплекса технологических параметров наплавки и обеспечение кинематической согласованности многокоординатных перемещений робота.

- *Во второй главе* разработана математическая модель для формирования траекторий многоосевой наплавки на роботизированных установках, оснащённых двухосевым позиционером. Модель позволяет преобразовать исходные траектории

в адаптированный формат, учитывающий углы наклона и поворота позиционера, что устраняет неопределённость, вызванную избыточными степенями свободы системы. Апробация модели показала повышение точности позиционирования инструмента на 70% (до 0,14 мм) по сравнению с исходным методом.

- *Третья глава* посвящена разработке средств технологической подготовки. Созданы специализированные средства технологической подготовки для генерации управляющих программ для роботизированных установок ПЛВ. Средства реализуют разработанную математическую модель и решают обратную задачу кинематики, позволяя получать как управляющие программы, так и данные для симуляции движений в САМ-системе. Практическая апробация показала сокращение времени выращивания на 7% и экономию материала.

- *В четвертой главе* излагаются выявленные ограничения технологии прямого лазерного выращивания. Систематизированы технологические ограничения ПЛВ, сгруппированные по процессу, геометрии и кинематике, и предложены рекомендации для их учета. Разработаны модели генерации управляющих программ и формирования слоёв, учитывающие эти ограничения. Результаты внедрены в техническое задание для разработки модуля аддитивных технологий в отечественной САМ-системе «ADEM».

- *В пятой главе* приведены результаты апробации методики прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок деталей ГТД. Методика интегрирует все предыдущие разработки: математическую модель, средства технологической подготовки и учёт ограничений. Апробация на изготовлении крупногабаритной заготовки детали «Кольцо наружное ВНА» подтвердила эффективность: масса заготовки снижена на 43%, а трудоёмкость изготовления – более чем в 2 раза по сравнению с традиционной технологией.

- *В заключении* сформулированы основные результаты и выводы по диссертации.

Автореферат удовлетворяет предъявляемым требованиям и в полной мере отражает содержание, результаты и выводы диссертации.

Новизна диссертации. Научная новизна диссертации заключается в разработке методики прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД, включающей математическую модель формирования траекторий многоосевой наплавки, и оригинальный алгоритм многоуровневого выращивания. В отличие от известных решений сформулированы ограничения технологии прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД с целью их учета при формировании траекторий многоосевой наплавки.

Положения и результаты, выносимые на защиту. Сформулированные научные положения логически вытекают из результатов проведенного исследования, являются в полной мере обоснованными достоверными. Достоверность результатов диссертации подтверждается корректной физической и математической постановкой задач, применением апробированных методов расчёта и анализа, обоснованностью допущений и ограничений, хорошей сходимостью расчётных и экспериментальных данных, а также положительным эффектом от использования результатов работы в производстве деталей ГТД.

Опубликование и представление результатов диссертации. Основные результаты диссертации нашли отражение в 25 публикациях по теме диссертационной работы в профильных рецензируемых научных журналах «Вестник Московского авиационного института», «Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение», «Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета», входящих в перечень ВАК, а также в индексируемых наукометрических базах Web of Science / Scopus, и конференционных изданиях E3S Web of Conferences, AIP Conference Proceedings. Результаты диссертации

представлялись на профильных отечественных и международных научных мероприятиях.

Теоретическая и практическая значимость диссертации.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке математической модели формирования траекторий многоосевой наплавки для роботизированных установок прямого лазерного выращивания, использующих двухосевой позиционер. Ключевым вкладом модели является обеспечение кинематической согласованности движений робота и позиционера при сохранении заданной пространственной ориентации технологического инструмента, что создаёт теоретическую основу для изготовления крупногабаритных заготовок за счёт активного использования поворотных степеней свободы позиционера. Дополнительный теоретический вклад заключается в создании оригинального алгоритма многоуровневого выращивания, основанного на процедуре копирования траекторий базового слоя, который формализует процесс сокращения избыточных вычислений при генерации управляющих программ.

Практическая значимость работы заключается в создании комплекса решений, позволяющих формировать траектории, адаптированные под кинематику совместного движения промышленного робота и позиционера. Это обеспечивает повышение точности позиционирования инструмента и геометрической точности изготавливаемых крупногабаритных осесимметричных заготовок деталей ГТД, а также предоставляет технологу инструмент для гибкого назначения режимных параметров. Внедрение алгоритма многоуровневого выращивания позволило достичь существенного сокращения времени генерации управляющих программ и снижения технологической трудоёмкости процесса. Значимым практическим результатом стала также систематизация технологических ограничений роботизированной многоосевой наплавки, что позволяет учитывать их в интерфейсе пользователя САМ-систем при проектировании технологических процессов.

Замечания. Результаты работы представляют собой практический интерес в вопросах проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок корпусных деталей авиационных ГТД методом прямого лазерного выращивания.

Вместе с тем, диссертационное исследование имеет ряд недостатков:

1. В диссертации не указано насколько погрешность настройки кинематической пары 6-и осевой робот – 2-х осевой позиционер сказывается на результирующей погрешности. Насколько ее величина соизмерима с погрешностью аппроксимации?

2. Диссертация не содержит сведений по искажениям геометрии от действия термических напряжений, возникающих при выращивании, соответственно не приводится их анализ и отсутствуют рекомендации по их учету. Производилась ли оценка влияния остаточных напряжений и насколько возникающие при этом искажения существенны для крупногабаритных деталей?

3. В математической модели используется расчетная погрешности круговой аппроксимации δ_0 , которая сравнивается с заданным на нее допуском $\delta_{\text{допустимое}}$ для определения возможности поворота позиционера. В диссертации не приводится расчет этого допуска. Необходим анализ связи его величины с требованиями к точности получения заготовки, иначе не очевидно, каким образом задавать значение этого допуска.

4. В разделе апробации указаны размеры образцов и условия выращивания, но не раскрыто, почему выбраны именно такие параметры (размер овала, шаг слоя, скорость наплавки и т. п.), что затрудняет оценить повторяемость результатов.

5. Не приведено обоснования применимости разработанной модели снижения доли перемещений манипулятора робота с большим вылетом относительно базы применительно к деталям с элементами формы, отличающимися по форме от осесимметричных (различного рода фланцы, приливы и т.п.).

Вышеизложенные замечания не снижают значимости и положительной оценки диссертационного исследования, не оказывают влияния на ключевые

научные и практические результаты, а также не касаются основных положений, представленных соискателем к защите.

Заключение. Диссертация Олейника М.А. на тему «Разработка методики прямого лазерного выращивания крупногабаритных заготовок корпусных деталей ГТД» является законченной научно-квалификационной работой, выполнена на высоком уровне и полностью соответствует требованиям новизны, научно-практической значимости и достоверности, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук в соответствии с действующим «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов. Считаю, что автор диссертации – Олейник Максим Андреевич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Колодяжный Дмитрий Юрьевич,

доктор технических наук по специальности 05.07.05 Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов, профессор кафедры технологии машиностроения ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 1

Тел. +7 (985) 969-71-67,

E-mail: kolod@mail.ru

Подпись руки *Колодяжного Д.Ю.* удостоверяю
УДИМК ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
Главный специалист
Журичкова И.В. МП



12.11.2025
Колодяжный Дмитрий Юрьевич