



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«ОБЪЕДИНЕННАЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНАЯ КОРПОРАЦИЯ»

## ОТЗЫВ

на автореферат Балякина Андрея Владимировича

«Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД методом прямого лазерного выращивания», представленный на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена высокой потребностью современного авиадвигателестроения в инновационных подходах к производству деталей газотурбинных двигателей (ГТД). Внедрение аддитивных технологий, в частности прямого лазерного выращивания (ПЛВ), открывает новые возможности для совершенствования технологических процессов. Особую значимость представляет применение ПЛВ при изготовлении крупногабаритных заготовок камер сгорания — критически важного узла авиадвигателя, который подвергается экстремальным нагрузкам и высоким температурам. Теоретическая проработка данного направления дополнена практической реализацией, успешно выполненной соискателем, что подчеркивает его вклад в развитие современных методов производства ГТД.

Цель исследования, ориентированная на повышение эффективности производства крупногабаритных деталей авиационных газотурбинных двигателей с использованием технологии прямого лазерного выращивания (ПЛВ), определена профессионально и соответствует современным потребностям двигателестроения. Выбор данного направления подтверждается высокой востребованностью аддитивных технологий для снижения трудоемкости изготовления, минимизации материалоемкости и сокращения сроков производства критически важных компонентов ГТД.

Научная новизна исследования обоснована следующими ключевыми результатами:

Входящий № 204-2377  
Дата 24 АПР 2025  
Самарский университет

1) Разработана математическая модель взаимодействия лазерного излучения с металлопорошковой композицией (МПК) в процессе прямого лазерного выращивания. Данная модель обеспечивает возможность численного анализа влияния технологических параметров на расстояние до зоны полного расплавления частиц МПК. Это позволяет не только оптимизировать технологический процесс, но и минимизировать возникновение дефектов за счет точного контроля условий плавления.

2) Проведено комплексное исследование влияния основных параметров процесса ПЛВ, таких как мощность лазера, скорость выращивания и расход МПК, на формирование геометрии заготовки, механические свойства материала, его микроструктуру и склонность к трещинообразованию. Особое внимание уделено анализу наплавляемого жаропрочного сплава ЭП648, где достигнуто отсутствие критических дефектов, таких как трещины.

3) Установлены рациональные технологические параметры ПЛВ для сплава ЭП648, обеспечивающие достижение требуемых физико-механических характеристик материала. Эти параметры позволяют гарантировать высокое качество получаемых заготовок при сохранении стабильности процесса.

4) Исследовано влияние расфокусировки лазерного излучения на качество поверхностей заготовок, включая точность геометрических размеров и стабильность процесса ПЛВ. Предложены новые параметры оценки качества рельефа верхней и боковых поверхностей заготовок, что значительно упрощает контроль и повышает эффективность производства.

5) Разработана методика проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок методом ПЛВ, которая успешно апробирована в реальных производственных условиях. Методика включает алгоритмы определения рациональных параметров процесса, коррекцию геометрии заготовок и контроль качества, что делает её применимой для широкого круга задач в авиационном двигателестроении.

Результаты, изложенные в диссертации, демонстрируют значительную теоретическую и практическую ценность. В теоретическом плане важным достижением стало создание математической модели взаимодействия лазерного излучения с материалом, которая учитывает энергетические параметры за пределами зоны расплава. Это позволило глубже понять процессы, происходящие при прямом лазерном выращивании. Кроме того, были установлены регрессионные зависимости, характеризующие влияние мощности лазерного излучения на механические свойства материала. Эти зависимости обеспечивают более

эффективный подход к оптимизации технологических параметров процесса, что значительно упрощает выбор рациональных режимов изготовления деталей.

Практическая ценность работы заключается в следующих аспектах:

1. Создан алгоритм для проектирования технологических процессов прямого лазерного выращивания (ПЛВ), который позволяет определять рациональные параметры и существенно повышает производительность изготовления крупногабаритных заготовок деталей газотурбинных двигателей (ГТД).

2. Проведен комплексный анализ влияния различных режимов термической обработки на микроструктуру и механические свойства жаропрочного сплава ЭП648, что обеспечивает улучшение эксплуатационных характеристик готовых изделий.

3. Реализован технологический процесс изготовления крупногабаритных заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД с использованием метода ПЛВ, подтвердивший свою эффективность при практическом внедрении.

4. Достигнута значительная экономия дорогостоящего материала ЭП648, составившая 138,4 кг, что снижает материалоемкость производства.

5. Обеспечено сокращение времени изготовления деталей в 2,5 раза, а также уменьшение количества технологических операций на 180 шагов для каждой детали, что существенно оптимизирует производственный процесс.

Следует выделить следующие значимые достоинства работы:

1. Исследование отличается глубокой теоретической проработкой, что подкреплено применением современных методов математического моделирования и анализа, обеспечивающих высокую достоверность полученных результатов.

2. Все научные выводы подтверждены экспериментальными данными, что значительно усиливает обоснованность и надёжность проведённых исследований.

3. Разработанные технологические процессы успешно реализованы на практике, что демонстрирует их готовность к внедрению в реальное производство и подчеркивает прикладную значимость работы.

При рассмотрении представленных результатов необходимо уделить внимание ряду замечаний, которые позволят повысить полноту и обоснованность исследования:

1. Отсутствует подробное описание методики подготовки образцов для испытаний, что снижает возможность воспроизводимости результатов другими исследователями. Детализация этапов подготовки позволит повысить достоверность и сопоставимость данных.

2. Алгоритм проектирования технологического процесса (ТП) представлен в виде блок-схемы, однако отсутствует развернутое описание ключевых этапов, таких как выбор стратегии изготовления заготовки или методы коррекции геометрии после термообработки. Уточнение этих аспектов повысит практическую применимость методики.

3. Не приведено сравнение характеристик заготовок, изготовленных традиционными методами и методом ПЛВ. Такое сравнение наглядно продемонстрировало бы преимущества нового подхода, включая снижение трудоемкости, повышение точности и экономию материала.

4. В автореферате не рассматривается возможность использования технологии прямого лазерного выращивания для ремонта деталей газотурбинных двигателей, а также для проведения опытно-конструкторских работ. Включение такого анализа могло бы значительно расширить сферу применения разработанной методики и повысить её значимость для авиационной отрасли, где восстановление высоконагруженных элементов является одной из ключевых задач. Использование ПЛВ в ремонтных работах позволило бы не только продлить срок службы деталей, но и оптимизировать затраты на их изготовление и обслуживание, что особенно актуально для современного двигателестроения.

Работа выполнена на высоком научном уровне и демонстрирует глубокий подход к решению важной задачи совершенствования производства крупногабаритных заготовок деталей газотурбинных двигателей (ГТД) с использованием технологии прямого лазерного выращивания (ПЛВ). Представленное исследование охватывает все ключевые аспекты данной проблемы, включая теоретическое моделирование, экспериментальные исследования и практическую реализацию. Полученные результаты имеют большое значение для прогресса аддитивных технологий в авиационном двигателестроении и могут быть эффективно применены при внедрении современных технологических процессов и модернизации существующих производственных систем. Работа представляет значительный интерес как для научного сообщества, так и для промышленности, связанной с созданием высокоэффективных авиадвигателей.

Указанные замечания не снижают общей значимости и достаточно высокого научно-технического уровня работы.

На основе вышесказанного можно заключить, что рассматриваемая диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения.

Работа соответствует всем критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а её автор, Балякин Андрей Владимирович, заслуживает присвоения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

*Согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку персональных данных, в том числе на размещение их в сети интернет, необходимых для процедуры защиты диссертации Балякина Андрея Владимировича, исходя из нормативных документов Правительства, Минобрнауки и ВАК.*

Главный эксперт  
кандидат технических наук



А.Я. Денисов

Денисов Анатолий Яковлевич: почтовый адрес – 105118, Москва, проспект Буденного, дом 16, АО «ОДК», Инженерный центр, Главный эксперт  
Телефон – 8 (495) 918-1117  
e-mail: [denisov@uecrus.com](mailto:denisov@uecrus.com)

*поручение заверено  
Дир. Захаров В.И.  
Департамент кадровой политики  
17.04.2025*