

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора Колодяжного Дмитрия Юрьевича на диссертационную работу Балякина Андрея Владимировича на тему: «Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД методом прямого лазерного выращивания», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

Актуальность темы диссертации. Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью разработки новых конструкций компонентов и узлов газотурбинных двигателей (ГТД), а также внедрения современных высокопроизводительных технологий, обеспечивающих снижение трудоемкости их изготовления. Это особенно важно в контексте растущих требований к ГТД по улучшению тягово-экономических характеристик, повышению надежности и эффективности, уменьшению веса при ограничении по стоимости.

Одной из перспективных технологий аддитивного производства является прямое лазерное выращивание (ПЛВ), которое обеспечивает:

- 1) Высокий коэффициент использования материала;
- 2) Возможность получения заготовок с минимальным припуском на последующую обработку;
- 3) Снижение времени изготовления крупногабаритных деталей в 2 раза по сравнению с традиционными методами.

Разработка технологии ПЛВ для изготовления крупногабаритных заготовок деталей камер сгорания ГТД из жаропрочных материалов является экономически выгодным направлением совершенствования технологических процессов. Следовательно, тема диссертации, направленная на разработку методики проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок деталей камер сгорания ГТД методом ПЛВ, является актуальной и соответствует приоритетным направлениям стратегии научно-технологического

Входящий № 206-2472
Дата 11 АПР 2025
Самарский университет

развития Российской Федерации до 2035 года и стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года.

Содержание работы. В диссертации А.В. Балякина предложена методика проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок для авиационных газотурбинных двигателей с использованием аддитивной технологии прямого лазерного выращивания. Эта методика позволяет в сжатые сроки 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 183 наименований и одного приложения. Общий объем диссертации составляет 232 страницы, содержит 89 рисунков и 46 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* диссертации анализируются аддитивные технологии, в частности ПЛВ, для создания крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД, включая камеры сгорания. Рассматриваются преимущества ПЛВ: создание сложных заготовок с минимальными затратами материалов и времени по сравнению с традиционными методами. Описываются технологические параметры процесса ПЛВ: мощность лазерного излучения, размер пятна и профиль луча, удельная энергия, расход металлопорошковой смеси и их влияние на качество заготовки, деформации и остаточные напряжения. Исследуется влияние расфокусировки лазера на рельеф поверхности заготовки, фазовый состав высоколегированного жаропрочного сплава на основе никеля и возможные дефекты. Делается вывод, что ПЛВ является эффективным методом для производства крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД. Цель работы — повысить производительность изготовления деталей ГТД с

использованием ПЛВ путем разработки методики определения рациональных технологических параметров.

- *Во второй главе* разработана математическая модель взаимодействия лазерного излучения с металлопорошковой композицией (МПК) на основе закона Бера–Ламберта для определения диапазона рациональных технологических параметров процесса ПЛВ, при которых происходит полное расплавление частиц МПК с образованием ванны расплава. Рассмотрен процесс передачи энергии лазерного излучения частице МПК в газопорошковой струе. Представлены результаты численного моделирования нагрева и плавления частиц МПК при различных параметрах технологического режима: скорости газопорошковой струи, насыпной плотности МПК, среднем радиусе МПК и мощности лазера. По результатам численного эксперимента установлен диапазон рациональных значений технологических параметров процесса ПЛВ.

- *Третья глава* посвящена исследованию физико-механических свойств жаропрочного никелевого сплава ЭП648, полученного методом ПЛВ. Выполнен входной контроль МПК на соответствие требованиям, предъявляемым к материалам, используемым в аддитивных технологиях. Определены рациональные технологические параметры, влияющие на предел прочности при растяжении и отсутствие дефектов в структуре наплавленного материала. Структурные исследования проводились на образцах, выращенных при мощности лазера от 1200 до 2200 Вт, в продольном и поперечном направлениях до и после проведения термической обработки. Для определения рациональных значений мощности автор использовал регрессионные модели. В работе подробно изучено влияние лазерной расфокусировки на точность размеров и качество получаемой поверхности в процессе ПЛВ. Предложены показатели для характеристики рельефа верхней поверхности и для боковых стенок с оценкой их эффективности. Показано, что знак расфокусировки имеет значительное влияние на точность и качество поверхности заготовки, получаемые в процессе ПЛВ. Изучено влияние режимов термической обработки на анизотропию свойств, на формирование структуры и твёрдость сплава ЭП648.

- *В четвертой главе* изложена методика проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок авиационных ГТД по технологии ПЛВ, базирующаяся на математической модели взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции (глава 2). Определены этапы изготовления заготовок по технологии ПЛВ. Разработаны и представлены блок-схемы алгоритмов: разработки заготовки детали, определения рациональных технологических параметров процесса ПЛВ, коррекции заготовки детали.

- *В пятой главе* приведены результаты апробации методики проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок ГТД методом ПЛВ на примере заготовок деталей камеры сгорания «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» из жаропрочного сплава ЭП648. По спроектированному технологическому процессу были изготовлены заготовки, а из них детали, проведены испытания в составе технологического двигателя на стенде ПАО ОДК «Кузнецов».

- *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 проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД прямым лазерным выращиванием, включающей аналитическую модель взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции, регрессионные зависимости и базу знаний для определения рациональных значений технологических параметров, в установление закономерности влияния величины расфокусировки лазера на геометрическую точность и параметры рельефа поверхностей заготовок. В отличие от известных решений предложены новые параметры оценки характерных изменений рельефа заготовок: отклонение и нестабильность высоты наплавки для

верхней торцевой поверхности и максимальная высота — для боковых стенок заготовки.

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 РГАТА имени П. А. Соловьёва», «Фундаментальные проблемы современного материаловедения», «Вестник Сибирского государственного индустриального 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* заключается в разработке новой математической модели взаимодействия лазерного излучения и МПК для процесса ПЛВ, учитывающей пространственно-энергетические параметры в зоне выращивания; получении регрессионных зависимостей влияния мощности лазерного излучения на прочностные характеристики наплавленного материала; предложении параметров для оценки качества рельефа верхней поверхности и боковых стенок заготовок.

Практическая значимость заключается в разработке методики проектирования технологических процессов ПЛВ крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД, включающей алгоритм проектирования и определение рациональных технологических параметров, снижающих трудоемкость, увеличивающих производительность и повышающих качество заготовок, в установлении влияния термической обработки на анизотропию свойств, микроструктуру и механические свойства сплава ЭП648; в разработке и реализации ТП изготовления крупногабаритных заготовок деталей «Кожух наружный камеры сгорания» и «Кожух внутренний камеры сгорания» ГТД из жаропрочного никелевого сплава ЭП648. Разработанная методика может быть применена на предприятиях, производящих газотурбинные двигатели аналогично опыту ПАО «ОДК-Кузнецов» (акт об использовании результатов диссертационной работы от 04.02.2025 г.) и АО «Самарские авиадвигатели» (акт внедрения результатов диссертации на от 04.02.2025 г.).

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

Вместе с тем диссертационное исследование имеет ряд недостатков:

1. В диссертации автором разработана аналитическая модель, которая описывает процесс передачи тепла от лазерного луча к частицам МПК в газопорошковой струе исходя из условия их полного расплавления. Приводится решение разработанной модели численными методами, а также расчеты параметров ПЛВ на его основе. Тем не менее, результаты расчетов не подтверждены натурными экспериментами. Во всяком случае отсутствуют данные по валидации модели, поэтому о ее достоверности можно судить лишь косвенно.

2. В исследовании не рассматривается вопрос влияния принятых ограничений (однородность гранулометрического состава, сферичность частиц МПК, форма лазерного излучения) на адекватность моделирования расплавления частиц МПК в

газопорошковой струе под воздействием луча лазера, что снижает достоверность моделирования с точки зрения применимости модели к МПК со значительной неоднородностью состава.

3. Результаты экспериментальных исследований показывают зависимость механических свойств материала от мощности лазера. Вместе с тем другие параметры ПЛВ такие как скорость подачи МПК, скорость наплавления оказывают существенное влияние на качество получаемых заготовок. Следовательно, требуется уделить должное внимание анализу их влияния, чего в диссертации сделано не было.

4. Исследование является актуальным в контексте современных требований предъявляемым к ГТД, особенно в части снижения трудоемкости и повышения эффективности производства с использованием технологии ПЛВ. Однако рекомендуется более детально обосновать экономический эффект от внедрения данной технологии по сравнению с традиционными методами изготовления заготовок.

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 А.В. Балякина на тему «Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных заготовок деталей авиационных ГТД методом прямого лазерного выращивания» 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 – Балякин

Андрей Владимирович - 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, проректор по научной деятельности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН"

127055, город Москва, Вадковский пер., д.1

Тел. +7 (499) 973-39-17,

E-mail: d.kolod@stankin.ru


04.04.2025

Колодяжный Дмитрий Юрьевич



Подпись руки *Колодяжного Д.Ю.* удостоверяю
УД ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
Главный бухгалтер
Коромалева И.В. *107000*
4.04.2025