

На правах рукописи



Селиверстов Сергей Дмитриевич

**КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ОБОГРЕВАЕМЫХ ЛОПАТОК ВХОДНЫХ НАПРАВЛЯЮЩИХ АППАРАТОВ
ГТД, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО
СПЛАВЛЕНИЯ**

Научная специальность 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Марчуков Евгений Ювенальевич

Официальные оппоненты: Смыслов Анатолий Михайлович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», профессор кафедры «Технологии машиностроения»

Левихин Артем Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», заведующий кафедрой «Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева».

Защита состоится «28» декабря 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.08 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г.Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»: <https://mai.ru/upload/iblock/5fc/crhgfv6gg463blk8lm2jhx0a22bznkhg/Dissertatsiya-Seliverstov-SD-final12.pdf>

Автореферат разослан «_____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.08
д.т.н., профессор

Зуев Юрий
Владимирович



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Современные газотурбинные двигатели (ГТД) не только создают тягу или крутящий момент для обеспечения движения летательного аппарата (ЛА), но и поддерживают работу различных вспомогательных систем. Одной из таких систем является противообледенительная система (ПОС) ЛА и двигателя, которая обычно включает в себя систему отбора воздуха от последних ступеней компрессора или вторичной зоны камеры сгорания, патрубков или полостей транспортировки подогреваемого воздуха, а также подогреваемых элементов входного устройства или коков, стоек и/или лопаток направляющего аппарата. Если для самолетных ГТД время работы ПОС является не значительным, то для вертолетных двигателей данная система имеет гораздо большее значение. В соответствии с устоявшимися летными требованиями и опытом эксплуатации вертолетных двигателей ПОС включается при температуре наружного воздуха ниже $+10^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности выше 70%, для некоторых двигателей подогрев осуществляется при температурах ниже $+7^{\circ}\text{C}$ без учета влажности. Таким образом ПОС на вертолетных двигателях может находиться в активном режиме достаточно продолжительное время, например при полетах в условиях горной местности и наличии облачности, в условиях северных широт, во время межсезонных дождей и снегопадов и при полетах над обводненными территориями в условиях низкой температуры. В общем цикле налета вертолета, время полетов с включенной ПОС может составлять 50% и более. Известно, что при работе ПОС мощность на валу двигателя снижается и может опускаться на 7% и более, а удельный расход топлива возрастает до 10% (по данным КБ вертолетостроения). Таким образом, совершенствование элементов ПОС двигателя является актуальной задачей, которая позволит повысить топливную эффективность и запас мощности при выполнении полетов в условиях возможного обледенения.

Основным элементом ПОС двигателя, как показал анализ конструкции вертолетного двигателя ТВЗ-117, является обогреваемая поворотная лопатка входного направляющего аппарата (ВНА) первой ступени. Конструктивное исполнение лопатки близко к лопаткам турбины прежде всего за счет наличия внутренних полостей. Используемые в изготовлении материалы являются трудно обрабатываемыми, а требования по шероховатости, коррозионной стойкости и другим характеристикам аналогичны требованиям, предъявляемым к лопаткам компрессора. Появление технологий послойной печати из металлокомпозиций открывает возможность обеспечить более высокие показатели эффективности ПОС лопаток ВНА, при сохранении или снижении массы лопатки, с одновременным удешевлением ее производства.

Применение аддитивных технологий, или технологий послойной печати сегодня является неотъемлемой частью двигателестроения, как в опытном, так и в серийном производстве. В частности, аддитивные технологии обладают рядом преимуществ перед традиционными технологиями производства: значительная экономия материала за счет изготовления непосредственно по 3D-модели; возможность изготовления сложнопрофильных и полых деталей; снижение числа технологических операций. В тоже время технологии послойной печати имеют ряд особенностей, основными из которых являются анизотропия свойств получаемых

изделий, зависящая от направления выращивания изделия в установке, режимов работы лазера и пр. В производстве деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок наиболее перспективной является технология селективного лазерного сплавления (СЛС), в которой формирование объемного изделия происходит путем синтеза металлического порошка в слое под воздействием лазерного излучения.

Положительный опыт применения технологии СЛС демонстрируют как зарубежные, так и отечественные компании. Однако существующие методики проектирования и программное обеспечение имеют недостаточно инструментов для проектирования изделий под аддитивное производство. Программное обеспечение, как правило, предлагает варьировать только параметрами скорости печати, стоимости и коробления детали, в то время как будущие эксплуатационные свойства спрогнозировать невозможно. Поэтому, в настоящее время изучение характеристик изделий, их эксплуатационных свойств осуществляется экспериментальным путем для каждого конкретного изделия. Кроме того, отсутствуют необходимые методики конструирования лопаток ГТД с внутренними полостями, учитывающие особенности материалов и технологии синтеза изделий при реализации процесса СЛС.

Степень разработанности темы. В России и за рубежом исследованием технологии СЛС, а также ее применением для изготовления деталей авиационного двигателестроения занимались многие ученые: М.А. Зленко, А.П. Назаров, И.В. Шишковский, В.Г. Смелов, В.М. Довбыш, J.P. Kruth, T. Ozel, A. Remier, E.M. Weissman, Chee Kai Chua и другие. Исследования большинства авторов направлены на изучение влияния технологических параметров процесса СЛС (мощность лазерного излучения, скорость и стратегия сканирования, толщина единичного слоя изделия и т.д.) на микроструктуру и физико-механические свойства изделий. Несмотря на рост количества отечественных разработок в области производства СЛС-машин, а также порошков для них, возможность варьирования технологическими параметрами не всегда возможна в полном объеме. Этот фактор значительно усложняет проектирование технологических процессов (ТП) для технологии СЛС.

В опубликованных работах недостаточно полно раскрывается вопрос разработки и применения методик проектирования ТП изготовления заготовок деталей ГТД с применением технологии СЛС. Специалисты институтов ВИАМ, ЦИАМ, компании GE Power дают лишь общие рекомендации к проектированию ТП, что недостаточно для получения изделий с заданными свойствами.

Цель работы: конструкторско-технологическое совершенствование обогреваемых лопаток ГТД, получаемых методом селективного лазерного сплавления.

Задачи работы:

1. Провести сравнительные экспериментальные исследования эксплуатационных и технических характеристик образцов из прутка марки AISI 316L и полученных по технологии СЛС из близкого по составу к AISI 316L металлического порошка CL 20ES;

2. Определить закономерности влияния угла ориентации образцов в камере построения в процессе СЛС на эксплуатационные и технические характеристики;
3. Разработать методику конструкторско-технологического совершенствования обогреваемых лопаток ВНА с ПОС за счет применения технологии СЛС при их изготовлении;
4. Разработать вариант конструкции обогреваемой лопатки ВНА, который обеспечит снижение расхода отбираемого для обогрева воздуха, а также реализуемый методом СЛС.

Объект и предмет исследования. Объект исследования – обогреваемая лопатка ВНА с ПОС. Предмет исследования – ТП изготовления заготовок обогреваемых лопаток ВНА с ПОС с применением технологии СЛС.

Новизна результатов исследований:

1. Установлена зависимость основных эксплуатационных характеристик (шероховатость, коррозионная стойкость, эрозионная стойкость, фреттинг-износ, теплопроводность) от угла ориентации в камере построения, а также определен предел выносливости для образцов из сплава CL 20ES.
2. Разработана комплексная методика проектирования обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, позволяющая реализовать рациональную конструкцию изделия, учитывающую анизотропию свойств, получаемую в процессе СЛС.
3. Определена и расчетно-математическими методами обоснована рациональная конструкция обогреваемой лопатки ВНА с ПОС для вертолетного ГТД, полученная с учетом разработанной методики проектирования обогреваемых лопаток ВНА с ПОС получаемых методом СЛС.

Теоретическая значимость работы заключается: в получении зависимостей влияния угла ориентации изделия в камере построения в процессе СЛС на эксплуатационные характеристики; в разработке регрессионной модели, позволяющей прогнозировать эксплуатационные характеристики изделий, получаемых методом СЛС в зависимости от угла ориентации изделия в камере построения.

Практическая значимость результатов исследований заключается: в снижении расхода воздуха на работу ПОС, и как следствие повышение общего КПД двигательной установки; в снижении итераций при разработке новых конструкций авиационного двигателестроения; в получении методических рекомендаций для конструкторов и технологов в авиационном двигателестроении по конструированию обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, получаемых методом СЛС.

Методы исследований. Экспериментальные исследования проводились на сертифицированном оборудовании с использованием аттестованных средств измерений. Исследования вариантов конструкций обогреваемых лопаток

осуществлялись с использованием программного комплекса Ansys CFX. Для разработки математической модели, позволяющей прогнозировать эксплуатационные характеристики изделий, получаемых методом СЛС в зависимости от угла установки изделия в камере построения использован графоаналитический метод.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований зависимости основных эксплуатационных характеристик (шероховатость, коррозионная стойкость, эрозийная стойкость, фреттинг-износ, теплопроводность) от расположения изделий в зоне построения, а также предел выносливости для образцов из сплава CL 20ES для заготовок обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, получаемых методом СЛС;
2. Регрессионная модель, позволяющая прогнозировать основные эксплуатационные характеристики изделий, получаемых методом СЛС в зависимости от угла ориентации изделия в камере построения;
3. Методика проектирования технологического процесса производства обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, получаемых с применением технологии СЛС.

Влад автора в проведенное исследование заключается: в постановке задач и формулировании технических требований к экспериментальным работам по определению основных эксплуатационных характеристик образцов, получаемых методом СЛС; в непосредственном участии в проведении экспериментов; в обработке экспериментальных данных; в разработке регрессионной модели, позволяющей прогнозировать основные эксплуатационные характеристики изделий, получаемых методом СЛС в зависимости от угла установки изделия в камере построения; в разработке основных положений методики проектирования и рекомендаций по конструированию обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, получаемых методом СЛС.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы были представлены на Международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, октябрь 2017 г.); форуме аддитивных технологий «Применение 3D-печати в различных отраслях промышленности» (Москва, май 2018 г.); II Международной научно-технической конференции «International Conference on Aerospace System Science and Engineering 2018» (Москва, 2018 г.); XVIII Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2019» (Москва, ноябрь 2019 г.); XLVI Международной научной конференции «Гагаринские чтения – 2020» (Москва, 2020 г.); Международной конференции по аддитивным технологиям и 3D-решениям «Индустрия-3D» (Москва, май 2021 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них 5 работ являются публикациями в рецензируемых научных изданиях и публикациями, приравненными к ним.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 95 наименований и 3 приложений. Общий объем диссертации составляет 124 страниц, 67 рисунков и 18 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационной работы. Сформулированы цель работы и задачи для её достижения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту, а также апробация результатов исследований, публикации по теме диссертационной работы.

В первой главе представлен анализ использования аддитивных технологий при изготовлении деталей авиационного двигателестроения. Приведены отечественный и зарубежный опыт применения аддитивных технологий, основанных на трехмерной печати из металопорошковых композиций. Использование аддитивных технологий позволяет комплексно улучшить процесс конструирования и изготовления деталей ГТД, делая его экономичнее и быстрее, а также получить конструкции изделий ранее считавшиеся сложно реализуемыми в производстве.

Согласно классификации ASTM, рассматриваются две основные группы технологий печати металлом: послойный синтез (bed deposition) и прямой синтез (direct deposition). К первой группе относятся технологии печати, где синтез металлического порошка осуществляется на заранее сформированном (нанесенном) слое, путем подвода энергии сфокусированным пятном лазерного или электронного излучения по определенной траектории (стратегии сканирования): это технологии селективного электронно-лучевого плавления (СЭЛП), СЛС и др. Ко второй группе относятся технологии печати, где синтез металлического порошка осуществляется непосредственно в зоне подвода материала и энергии – технологий лазерной наплавки. Основные параметры аддитивных технологий на металлической основе представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры аддитивных технологий на металлической основе.

Характеристика	СЛС	СЭЛП	Лазерная наплавка
Скорость построения	5-20 см ³ /ч	до 80 см ³ /ч	до 70 см ³ /ч
Точность построения	±0,02-0,05 мм	±0,2 мм	±0,125-0,25 мм
Максимальные габариты детали	1500 мм × 1000 мм × 1000 мм	350 мм × 350 мм × 430 мм	Ограничены рабочим диапазоном робота

Во второй главе представлена информация об условиях работы и эксплуатационных требованиях к обогреваемым лопаткам ВНА с ПОС. Объектом исследования является лопатка ВНА с ПОС двигателя ТВ3-117 (рис. 1). Лопатка имеет сложную пространственно изогнутую аэродинамическую форму, устанавливается в корпус двигателя через втулки, поворотная. Для обогрева лопатки отбирается воздух за V ступенью компрессора, который после прохождения через полости лопатки попадает обратно в тракт. Поскольку лопатка является частью ВНА, она подвержена коррозионному и эрозионному износу.

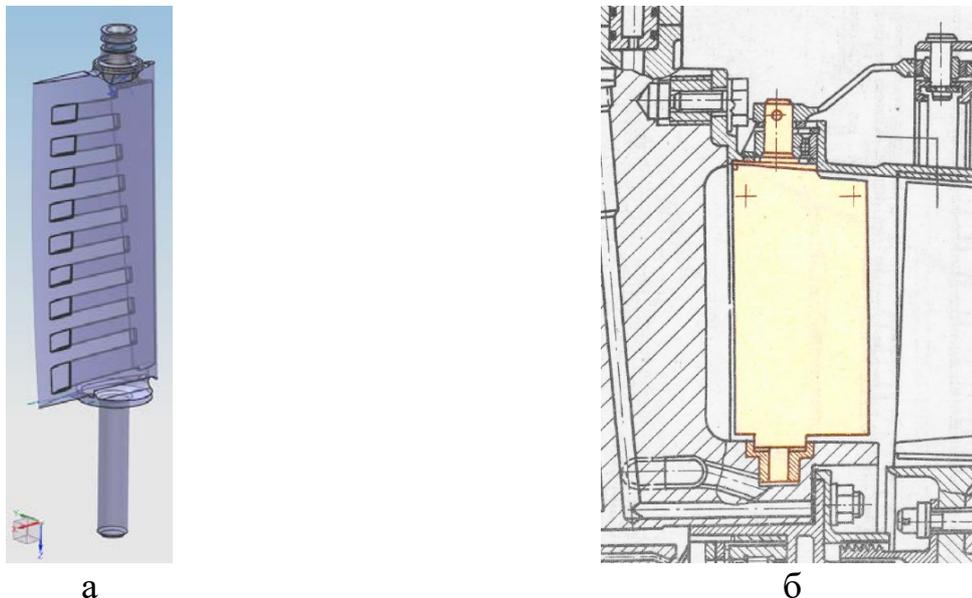


Рис. 1. Обогреваемая лопатка ВНА с ПОС: а – 3Д-модель лопатки, б – расположение лопатки в корпусе первой опоры двигателя

Традиционная технология изготовления лопатки ВНА с ПОС включает в себя множество операций, в том числе изготовление металлических пресс-форм методами механической обработки, последующие операции формовки оболочки, фрезерование внутренних каналов, пайку/сварку оболочек, финишную механическую и химическую обработку. Все эти трудоемкие и длительные операции производства можно заменить выращиванием их из стали аддитивным методом.

В третьей главе представлены материалы, оборудование и методики исследований эксплуатационных характеристик.

В первой части главы описаны оборудование и материалы для изготовления образцов. В качестве используемого металлического порошка для изготовления аддитивных образцов был использован порошок CL 20ES компании Concept Laser, для изготовления использовалась СЛС-машина M2 Cusing компании Concept Laser. Также были изготовлены образцы сравнения методами механической обработки, материал образцов сравнения – нержавеющая сталь AISI 316L. Аддитивные образцы изготавливались под углами 0, 45 и 90 градусов к платформе построения.

Во второй части главы описаны оборудование и методики проведения экспериментов для определения эксплуатационных характеристик образцов. Для исследования микроструктуры и элементного состава поверхностей исследуемого аддитивного материала применялись методы сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа с использованием установки Carl Zeiss EVO-40 и приставки EDS INCA X-ray Oxford instr на предварительно подготовленных шлифах. Шероховатость образцов определялась с помощью конфокального интерференционного микроскопа Olympus LEXT OLS 5000 на поверхностях образцов, ориентированных под углами 0, 45 и 90 градусов к платформе построения. Исследования на фреттинг-износ проводились на разработанной на кафедре 205 МАИ машине трения, тип контактного взаимодействия – сфера/плоскость, контртело – сфера из оксида алюминия, режимы трения 1/60 и 4/5 (нагрузка (Н)/перемещение (мкм)). После испытаний на образцах исследовались

пятна износа с помощью конфокального интерференционного микроскопа Olympus LEXT OLS 5000. Усталостные испытания проводились на оборудовании специального назначения для проведения усталостных испытаний рабочих лопаток ГТД и других объектов в резонансном режиме возбуждения при симметричном цикле нагружения в условиях рабочих температур по ГОСТ РВ 2840-001-2008. Для оценки сопротивления синтезированного аддитивного порошка коррозионному износу были проведены сравнительные испытания на стойкость к питтинговой коррозии. Она оценивалась ускоренным химическим методом, регламентированным ГОСТ 9.912-89. Для определения стойкости к эрозионному износу были проведены сравнительные испытания на экспериментальном стенде по изучению абразивного износа конструкционных материалов и защитных покрытий согласно стандарту ASTM G76-13. Испытания на теплопроводность проводились на разработанной на кафедре 204 МАИ экспериментальной установке для определения контактного термического сопротивления.

Четвертая глава посвящена анализу полученных результатов исследований эксплуатационных характеристик.

Микроструктура и химический анализ показали, что напечатанные образцы не имеют выраженных дефектов (пор, трещин). Проведенный качественный рентеноспектральный микроанализ подтвердил, что химический состав сплавленного образца соответствует заявленному производителем.

Проведенные физико-механические испытания аддитивных образцов подтвердили, что предел прочности на разрыв используемого материала не уступает прутку стали 316L.

По результатам определения шероховатости на различно ориентированных поверхностях аддитивных образцов было установлено, что наименьшая шероховатость непосредственно после процесса печати (без какой-либо обработки, кроме термической) достигается на поверхностях, ориентированных под углом 90 градусов к платформе построения ($Ra=11$). Наибольшая шероховатость получается при угле 45 градусов ($Ra=80$) (рис. 2).

Проведенные испытания на фреттинг-износ показали, что угол ориентации образца при печати в целом не влияет на характер и степень износа. Эксперименты на двух режимах трения также позволяют сделать вывод, что в сравнении с образцом из прутка аддитивные образцы показывают схожий износ трением.

Усталостные исследования аддитивных образцов показали, что предел выносливости установился в

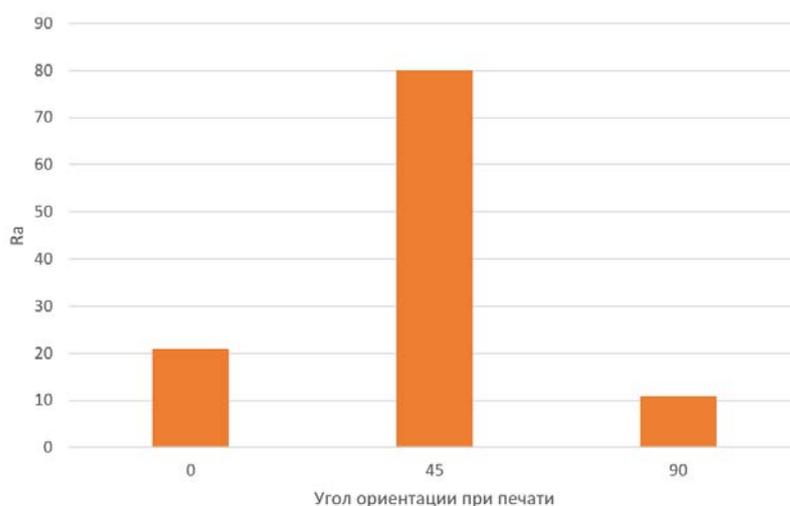


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности образца после СЛС от угла ориентации при печати

районе 372 Н/мм^2 , что на 40% выше предела выносливости для образцов из стали 316L.

Проведенные испытания на эрозионный износ показали, что абразивная стойкость аддитивных образцов на 10-15% ниже, чем у образца сравнения. Также установлено, что шероховатость поверхности может сильно менять характер износа в первый момент времени.

Проведенные исследования теплопроводности аддитивных образцов выявили анизотропию свойств теплопроводности. Так, образец, напечатанный под углом 0 градусов к платформе построения имеет теплопроводность на 25-30% выше, чем образец, напечатанный под углом 90 градусов. Помимо этого, теплопроводность аддитивных образцов на 16-83% выше, чем у образца из стали 316L, что необходимо учитывать в задачах проектирования деталей ГТД.

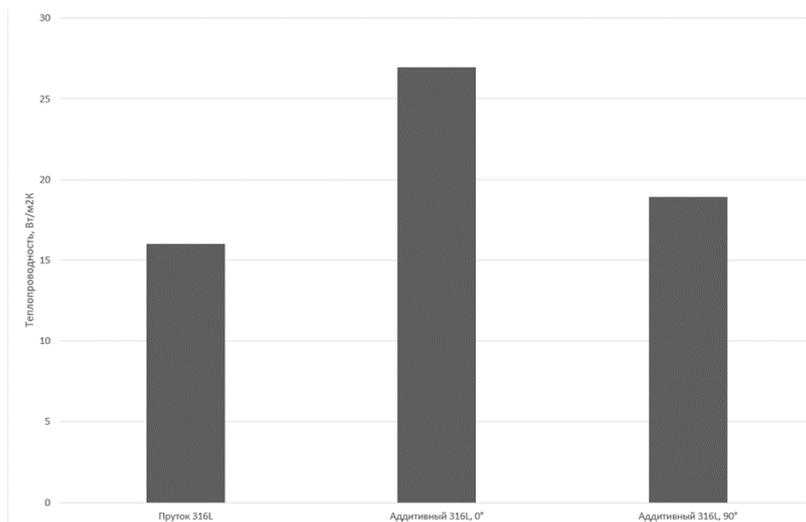


Рис. 3. Сравнение теплопроводности аддитивных образцов с образцов из прутка

Полученные значения коррозионной стойкости показали, что аддитивные образцы имеют более низкую стойкость к питтинговой коррозии.

В пятой главе приводится методика конструкторско-технологического совершенствования обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, получаемых методом СЛС.

В первой части главы рассмотрена зависимость пористости от угла ориентации в камере построения. Проведенный анализ литературы позволяет сделать вывод о том, что наименьшая пористость при СЛС образцов обогреваемых лопаток ВНА образуется при расположении детали под углом в 45 градусов относительно платформы построения. Также отмечено, что толщина фрагмента детали напрямую влияет на количество пор.

Во второй части главы рассмотрен эффект деформации отверстий и пазов при изготовлении методом СЛС. Проведен анализ работ, посвященных вопросу воспроизводимости отверстий и пазов малых размеров. Некоторые авторы отмечают, что под углом 0 градусов относительно платформы построения невозможно получить отверстия диаметром менее 0,8 мм, а под углами 45 и 90 градусов могут наблюдаться отклонения размеров до -0,2 мм. С целью экспериментальной проверки данных из открытых источников было проведено экспериментальное исследование моделей каналов полых лопаток с отверстиями диаметром 1 мм. Результаты продувок и проливок показали, что расход через канал образцов полученных СЛС в среднем на 45% ниже, чем через канал, изготовленный методом литья. Этот факт оказался связан с меньшим фактическим диаметром отверстий в каналах (до 0,7 мм). В ходе дальнейшей работы было установлено, что нивелировать меньший размер отверстий эффективно путем электроимпульсной полировки и последующей

электрохимической полировки. Исходя из полученных данных, а также из обзора работ других авторов, сделано предположение, что эффект деформации отверстий можно учесть при проектировании изделия, заложив больший диаметр отверстия.

В третьей части главы приводится регрессионная модель, учитывающая зависимость эксплуатационных свойств от угла ориентации в камере построения. На основании результатов экспериментов, а также информации из открытых источников, построены графики зависимости эксплуатационных характеристик материала CL 20ES от угла ориентации в камере построения (рис. 4-7).

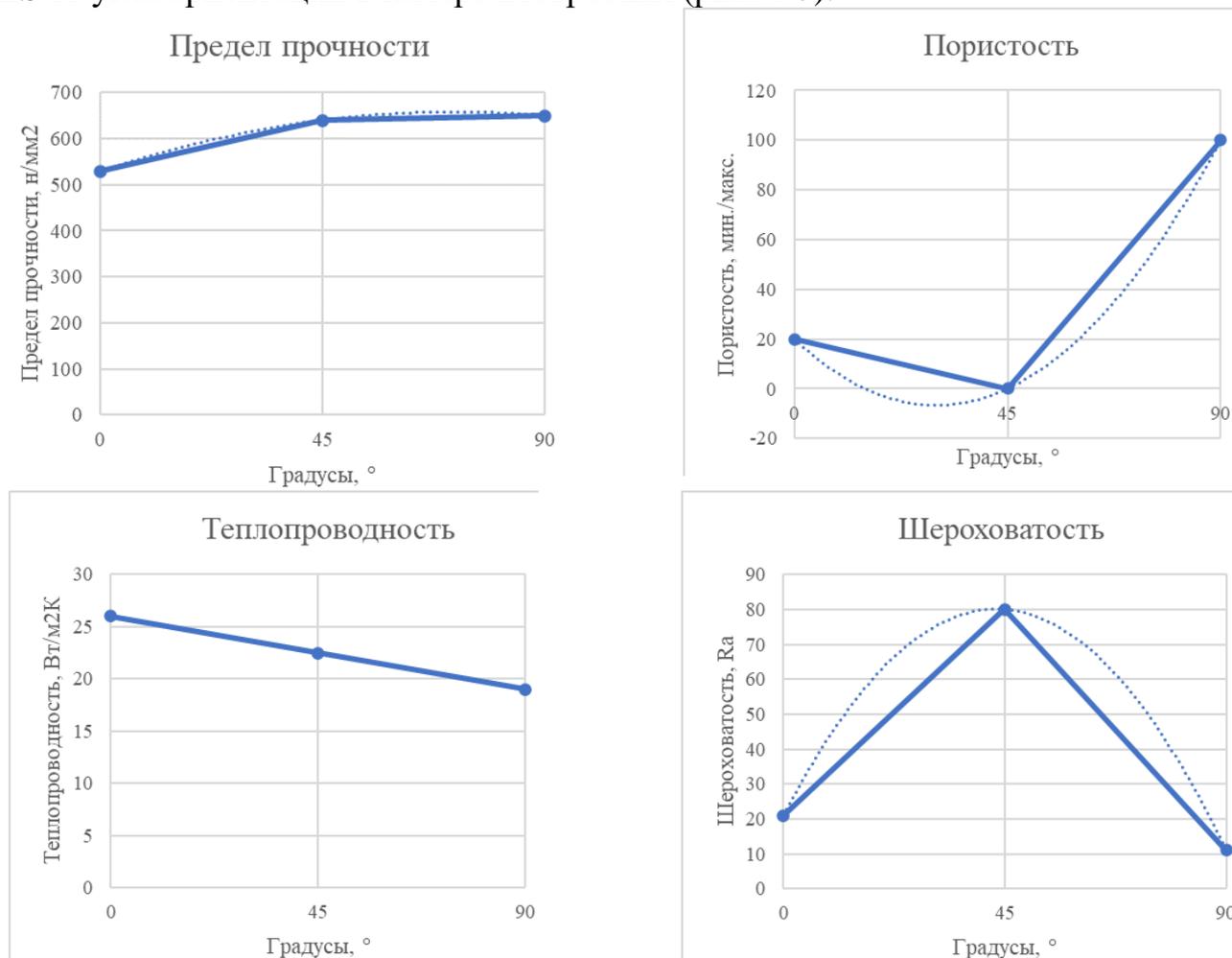


Рис. 4-7. Графики зависимости эксплуатационных характеристик материала CL 20ES от угла ориентации в камере построения

Далее методом аппроксимации получены функции для каждого из графиков:

$$\begin{aligned}
 a(x) &= -0.0249x^2 + 3.5889x + 529 \\
 b(x) &= \begin{cases} -0.4444x + 20, & 0 \leq x < 45 \\ 2.2222x - 100, & 45 \leq x \leq 90 \end{cases} \\
 c(x) &= -0.0778x + 26 \\
 d(x) &= -0.0316x^2 + 2.7333x + 21
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $a(x)$ – предел прочности (Н/мм²), $b(x)$ – относительная пористость (мин./макс. пор), $c(x)$ – теплопроводность (Вт/м²К), $d(x)$ – шероховатость (Ra), x – угол ориентации в камере построения (град.). Для всех функций сохраняется условие $x \in [0; 90]$, поскольку исследовался этот диапазон углов при печати.

Подстановкой значения угла ориентации в построенную модель можно спрогнозировать рассмотренные эксплуатационные характеристики на этапе конструирования изделия, а также выбрать оптимальное положение в зоне построения с целью обеспечения целевых показателей качества изделия.

В четвертой части главы приводится методика проектирования и рекомендации по конструированию обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, получаемых методом СЛС. Схема процесса проектирования приведена на рис. 3. Ключевым моментом, на который необходимо обратить внимание, является включение этапа технологической подготовки производства лопатки в цикл проектирования конструкции (рис. 3-4). Такой подход обусловлен инерционностью процесса формирования рабочего пространства зоны построения установки, с учетом многократного перерасположения модели заготовки в пространстве построения и необходимостью перепроектирования поддерживающих структур и теплоотводов с обязательным моделированием НДС заготовки с учетом тепловых деформаций в процессе синтеза.

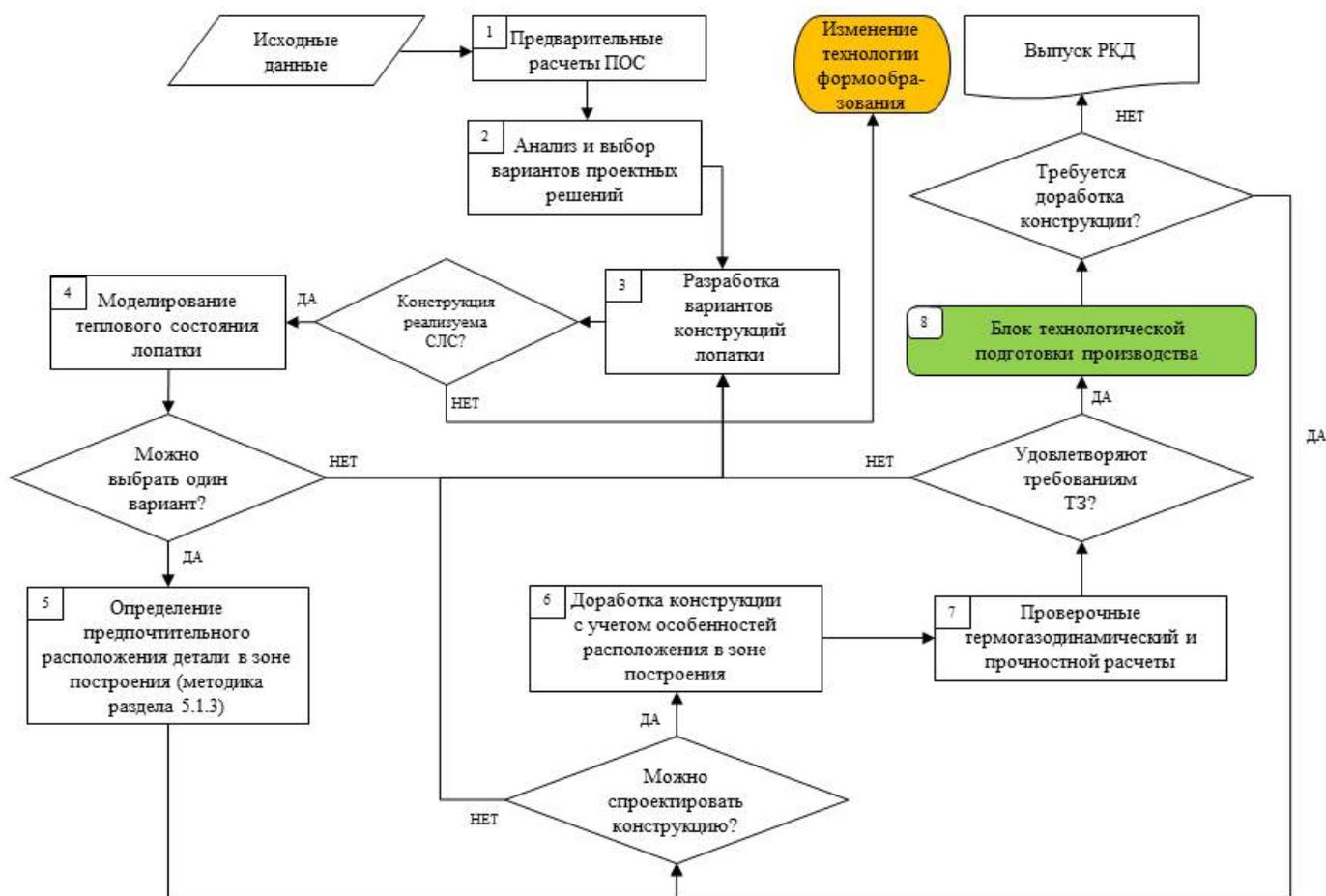


Рис. 8. Схема процесса проектирования обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, получаемых методом СЛС

В связи с особенностями метода СЛС, важно отметить непосредственное включение этапа технологической подготовки производства (этап 8, рис. 4), так как ранее было показано, что технологические особенности непосредственно влияют на конструкцию изделия.

Таким образом, выбор расположения изделий и их конструкция являются ключевыми для технико-экономического обоснования при применении технологии СЛС.

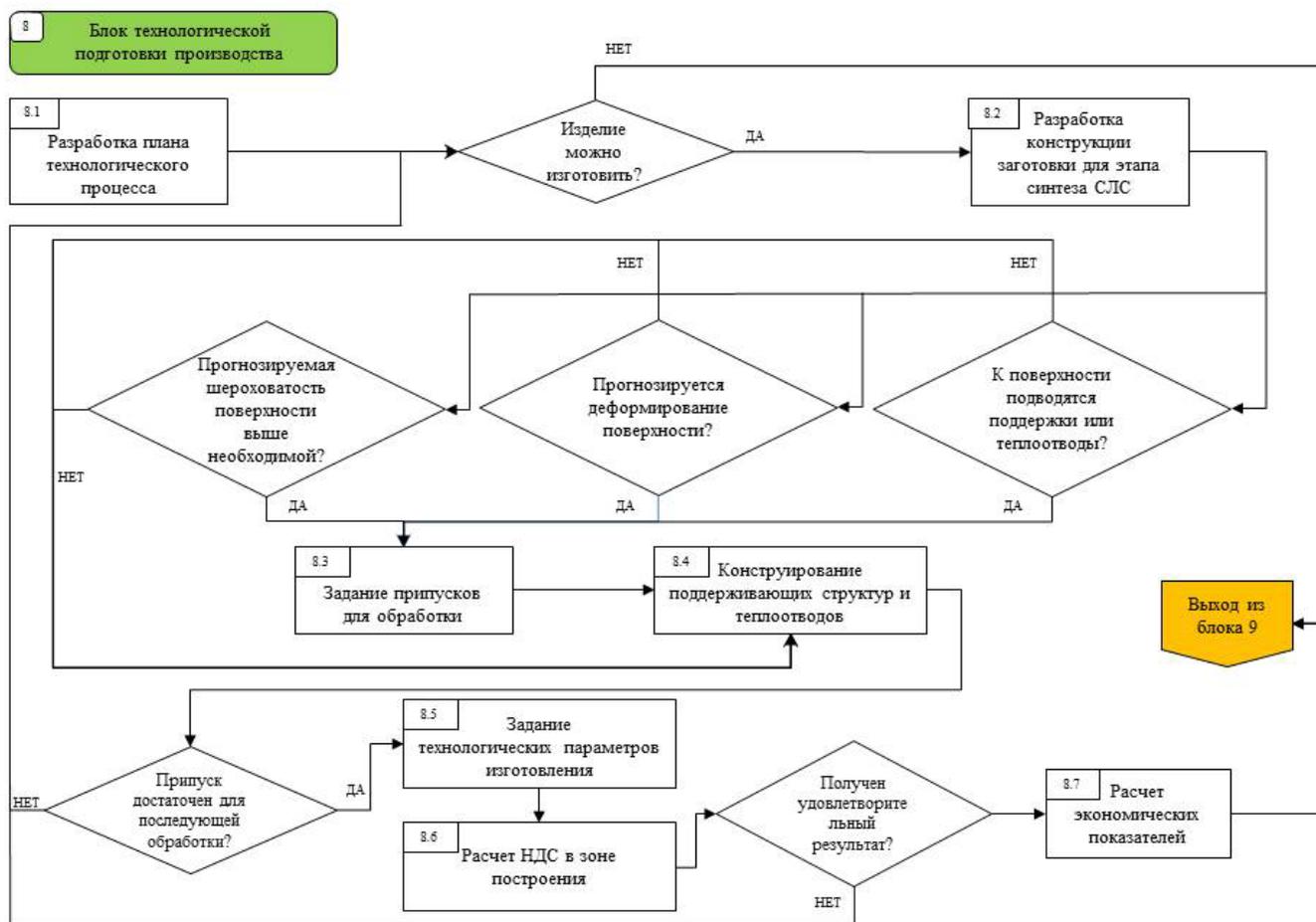


Рис. 9. Схема процесса технологической подготовки производства обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, получаемых методом СЛС

В пятой части главы проводится оценка распределения тепловых потоков и расхода воздуха для обогреваемой лопатки ВНА с ПОС. Поскольку одним из путей повышения КПД двигательной установки является снижение расхода воздуха на различные узлы, предлагается уменьшить расход воздуха, отбираемого от компрессора на обогрев лопаток ВНА при работе ПОС. Добиться этого возможно путем усовершенствования внутренней геометрии лопатки ВНА, обеспечив более равномерное течение и прогрев при меньшем расходе.

В ходе работ был проведен сравнительный расчет в программном комплексе Ansys CFX четырех конструкций лопатки ВНА (рис. 10):

1. Оригинальная конструкция;
2. Конструкция с единой полостью;
3. Конструкция со сплошными перегородками;
4. Конструкция с не сплошными перегородками.

Во всех модифицированных конструкциях также было удалено технологическое отверстие, расположенное в нижней части лопатки. Часть результатов моделирования приведены на рис. 11-12.

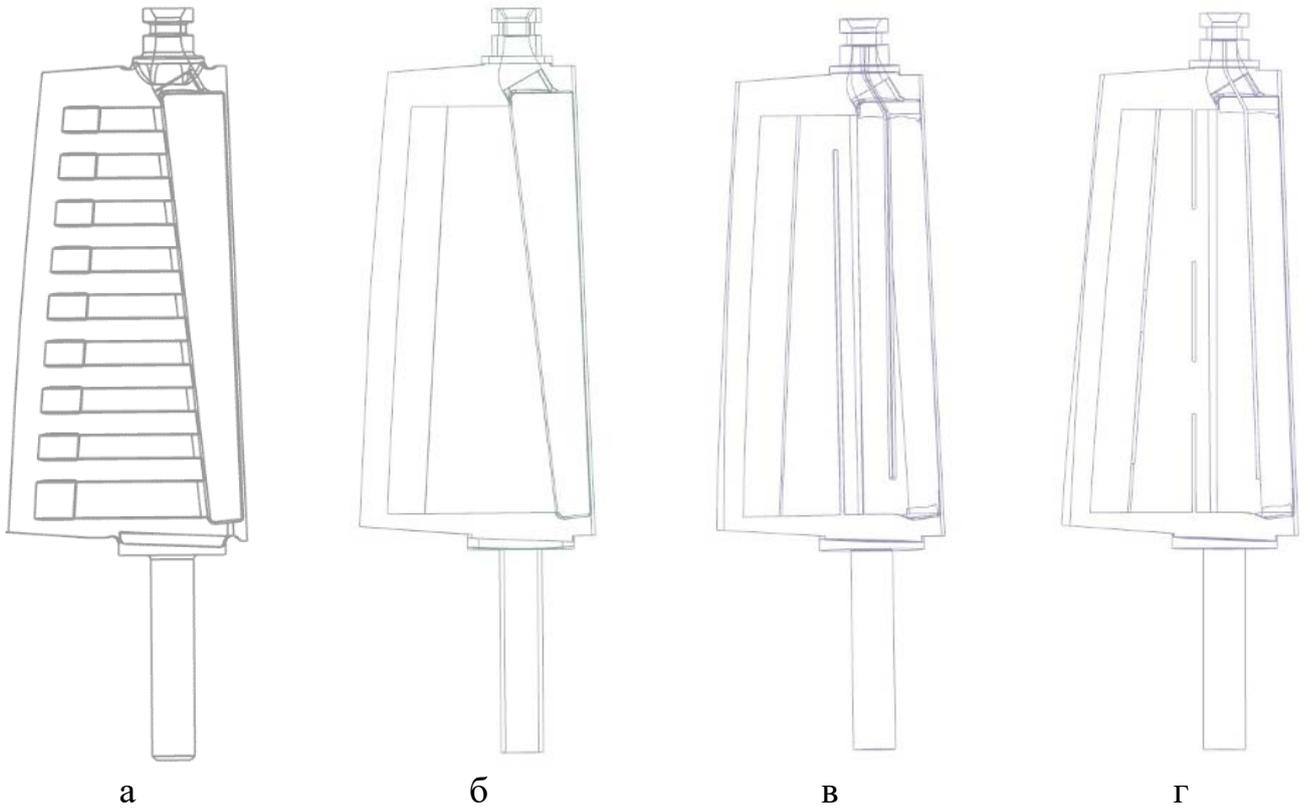
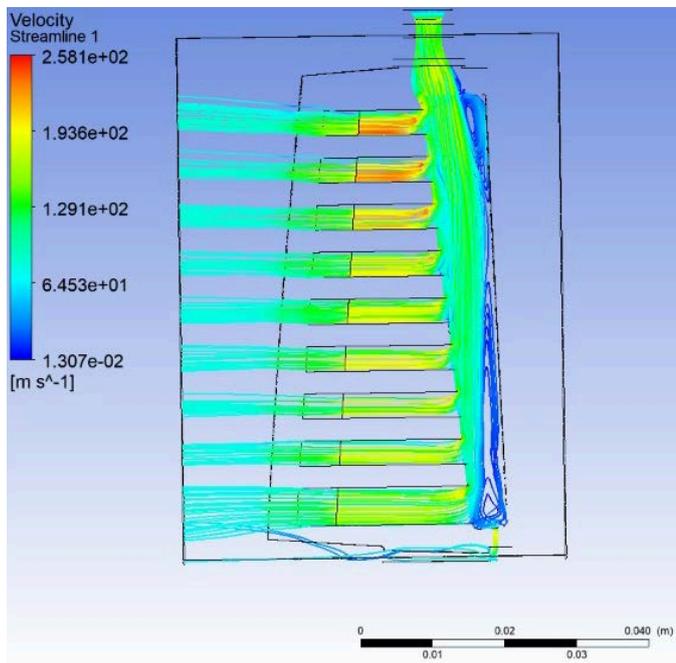
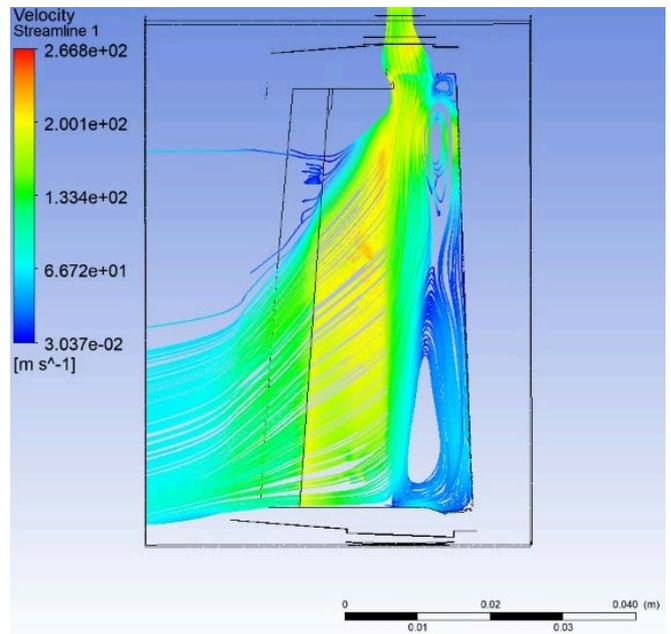


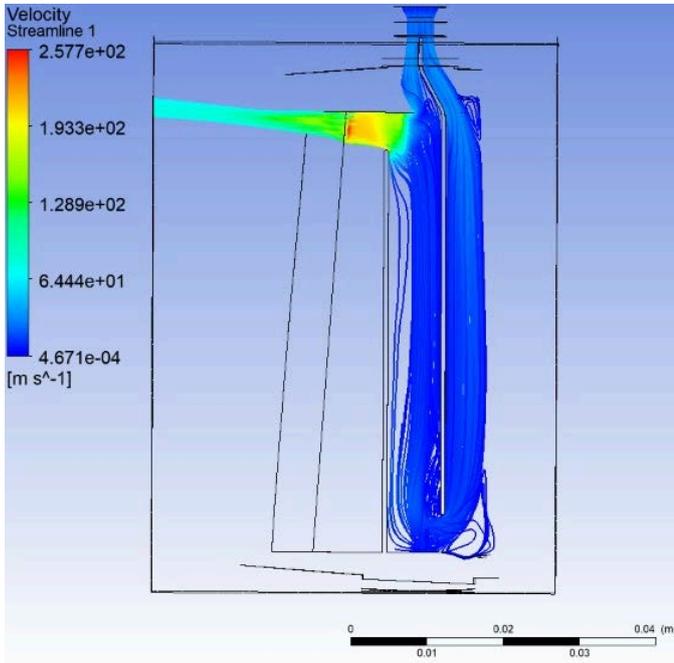
Рис. 10. Варианты конструкции обогреваемой лопатки ВНА с ПОС: а – оригинальная конструкция, б – конструкция с единой полостью, в – конструкция со сплошными перегородками, в – конструкция с не сплошными перегородками



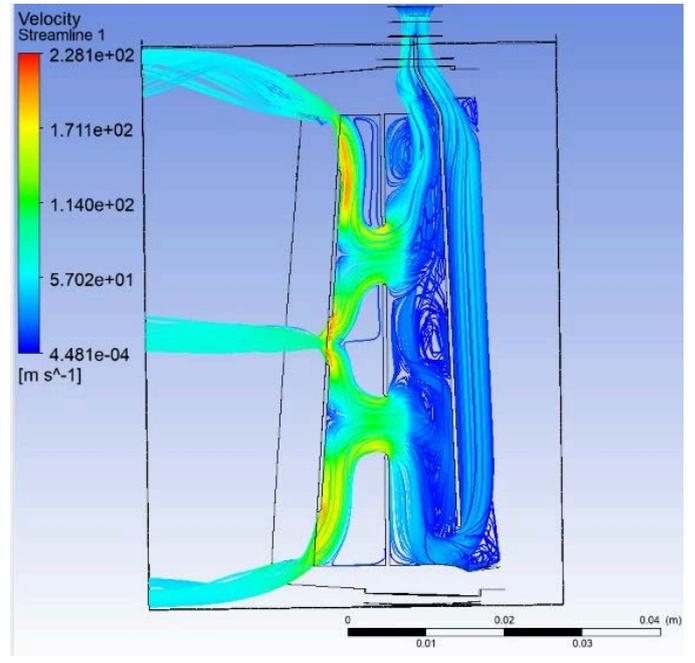
а



б

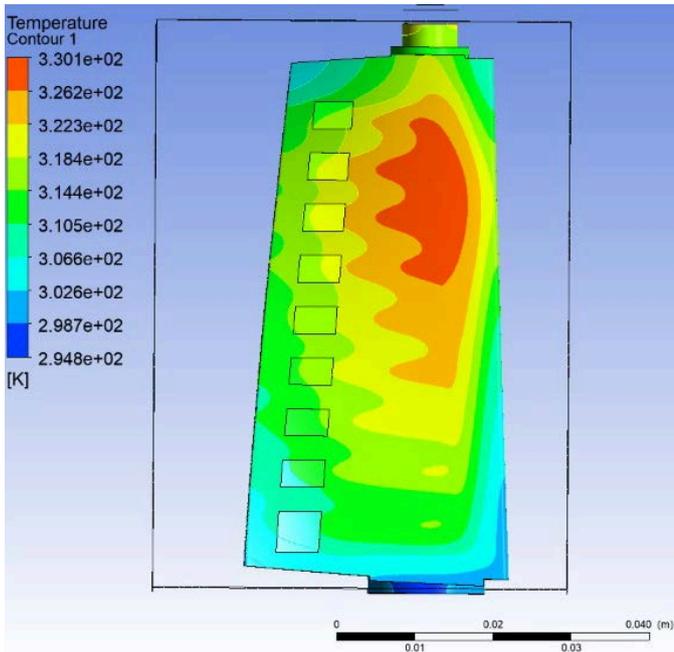


а

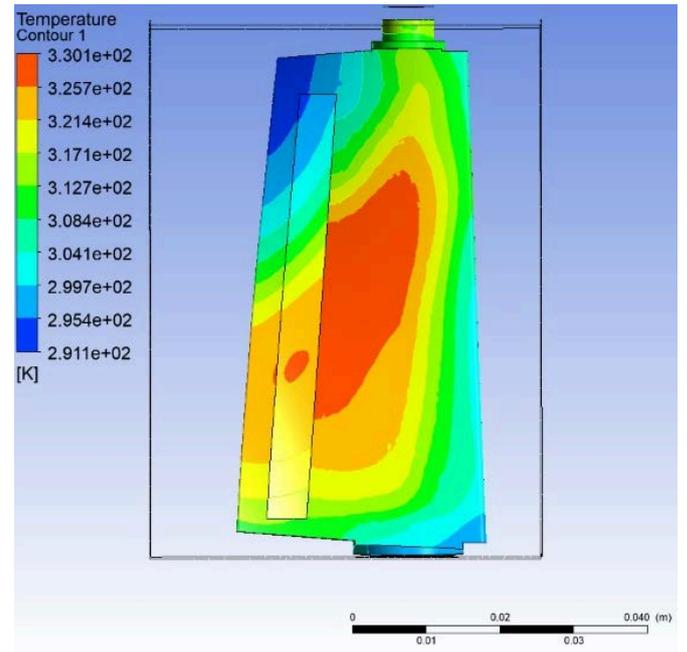


б

Рис. 11. Распределение потоков воздуха внутри лопаток: а – оригинальная конструкция, б – конструкция с единой полостью, в – конструкция со сплошными перегородками, г – конструкция с не сплошными перегородками



а



б

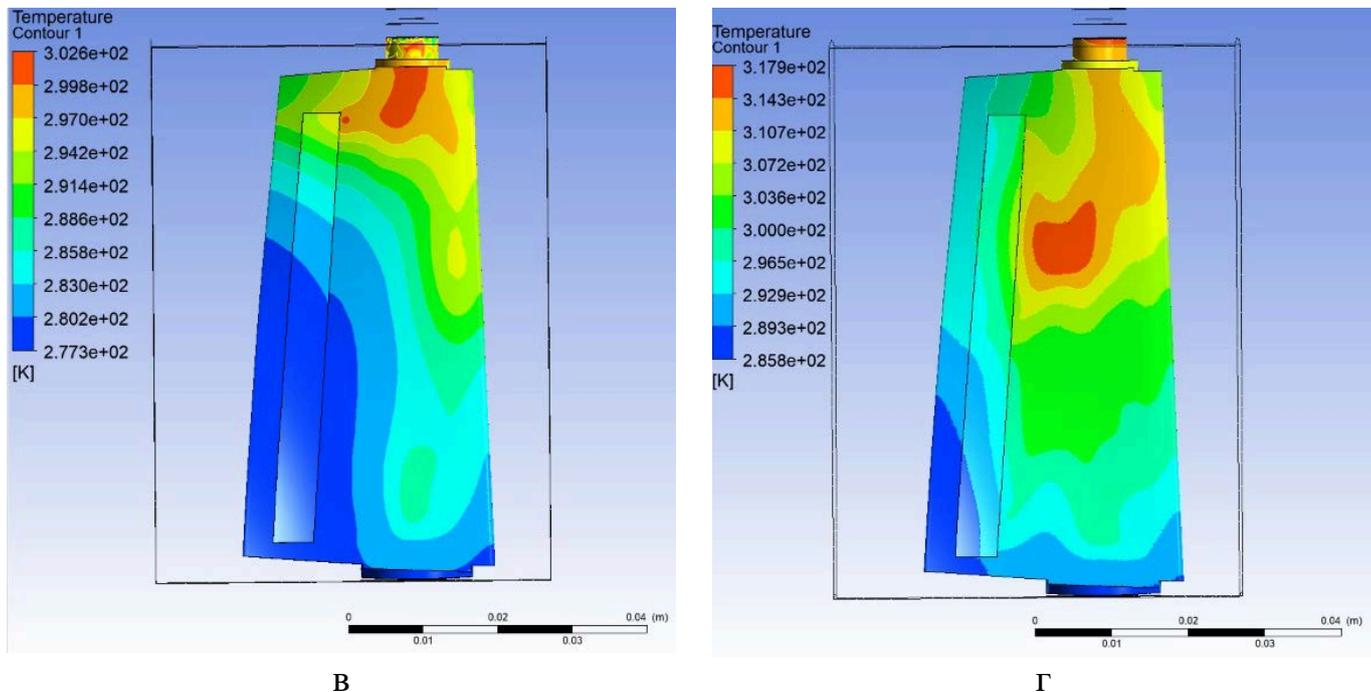


Рис. 12. Распределение температур на поверхности корытца лопаток: а – оригинальная конструкция, б – конструкция с единой полостью, в – конструкция со сплошными перегородками, г – конструкция с не сплошными перегородками

В рамках рассматриваемой задачи было необходимо обеспечить уменьшение расхода воздуха, отбираемого для обогрева лопатки ВНА при сохранении степени подогрева. Для наглядности, данные по расчетам представлены в таблице 2.

Из рассмотренных конструкций наиболее удачной была принята конструкция с не сплошными перегородками. Несмотря на то, что в результате изменения полости лопатки минимальная температура на поверхности снизилась на 9 градусов, это можно считать допустимым, поскольку в самом холодном месте лопатка все равно имеет положительную температуру (12,8 °С). При этом в такой конструкции расход обогревающего воздуха снизился в 3 раза по сравнению с оригинальной конструкцией.

Сама конструкция полностью реализуема технологией СЛС: лопатка не содержит закрытых полостей, а размеры перегородок не требуют обязательных поддерживающих структур.

Таблица 2. Результаты термогазодинамических расчетов различных конструкций лопаток

Конструкция лопатки	Минимальная температура на поверхности, К	Расход обогревающего воздуха, г/с
Оригинальная конструкция	294,8	3,805
Конструкция с единой полостью	292,5	3,826
Конструкция со сплошными перегородками	277,3	0,594
Конструкция с не сплошными перегородками	285,8	1,243

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено решение значимой задачи в области авиационного двигателестроения, имеющей существенное значение для конструкторско-технологического совершенствования обогреваемых лопаток ВНА с ПОС за счет разработанной методики конструирования с учетом особенностей метода СЛС.

В процессе работы были получены следующие результаты:

1. Для синтезированного порошка CL 20ES получены зависимости влияния угла ориентации изделия в камере построения в процессе СЛС на основные эксплуатационные характеристики: шероховатость поверхности, фреттинг-износ, коррозионный износ, эрозионный износ, теплопроводность.

2. Экспериментальным путем установлено, что теплопроводность синтезированного порошка CL 20ES зависит от угла ориентации изделия в камере построения. Наибольшая теплопроводность достигается при угле в 0 градусов к платформе построения, а наименьшая при 90 градусах.

3. Разработана регрессионная модель, позволяющая прогнозировать основные эксплуатационные характеристики изделий, получаемых методом СЛС в зависимости от угла ориентации изделия в камере построения.

4. Разработана методика проектирования и рекомендации по конструированию обогреваемых лопаток ВНА с ПОС, получаемых методом СЛС. Полученная методика может служить методической рекомендацией для конструкторов и технологов при изготовлении деталей методом СЛС, что позволит сократить число итераций при создании новых изделий, получаемых методом СЛС.

5. Методами математического моделирования получена модифицированная конструкция обогреваемой лопатки ВНА с ПОС, которая обеспечивает снижение расхода воздуха, отбираемого на обогрев лопатки и как следствие повышение характеристик двигательной установки.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях и публикации, приравненные к ним

1. Боровиков Д.А., Боровик И.Н., Ионов А.В., Селиверстов С.Д., Яковлев А.А. Анализ результатов математического моделирования осевой малоразмерной турбины в программном комплексе Numesa FineTurbo // Насосы. Турбины. Системы. 2018. № 3 (28). С. 76-81.

2. Киселев В.П., Ежов А.Д., Селиверстов С.Д., Быков Л.В., Сотник Е.В. Анизотропия теплопроводности аддитивных металлов, полученных методом селективного лазерного сплавления на примере нержавеющей стали CL 20ES // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13, № 7. С. 329-335.

3. Марчуков Е.Ю., Селиверстов С.Д., Стародумов А.В., Чирков Д.Д. Расходные характеристики каналов лопаток газотурбинных двигателей, полученных методом селективного лазерного сплавления // Насосы. Турбины. Системы. 2021. № 1 (38). С. 27-37.

4. Селиверстов С.Д., Николаев И.А., Быценко О.А. Трибологические исследования деталей авиационных двигателей, полученных методом селективного лазерного сплавления // Вестник УГАТУ. 2021. №3 (93). С. 64-71.

5. Starikov P., Ionov A., Seliverstov S., Borovik I., Matushkin A. Mathematical modeling of heat transfer processes in a wall with a regular pseudo-pore structure // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2019. V. 549. P. 155-168. DOI: 10.1007/978-981-13-6061-9_10

Другие публикации

6. Николаев И.А., Селиверстов С.Д., Лесневский Л.Н., Кожевников Г.Д. Исследование влияния направления выращивания образцов из стали 12X18H10T, полученных методом селективного лазерного сплавления (SLM), на фреттинг-износ в условиях полного и частичного проскальзывания // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»: сборник тезисов конференции (Москва, 23-27 ноября 2020). – М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. С. 177-178.

7. Селиверстов С.Д., Николаев И.А., Королева А.Г. Трибологические исследования деталей двигателей летательных аппаратов, полученных методом селективного лазерного спекания // XLVI Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2020»: сборник тезисов докладов (Москва, 27 декабря 2019-17 апреля 2020). – М.: МАИ, 2020. С. 179-180.

8. Селиверстов С.Д., Ионов А.В., Боровик И.А., Мацаев А.А. Лазерная наплавка тепловых аккумуляторов для ёмкостного охлаждения малоразмерных ЖРД // 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»: сборник тезисов конференции (Москва, 18-22 ноября 2019). – М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2019. С. 68.

9. Селиверстов С.Д., Гевара Г.А., Талахов К.Д. Применение технологии аддитивного производства для изготовления лопаток ГТД с внутренними полостями // XLIV Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2018»: сборник тезисов конференции (Москва-Ахтубинск-Байконур, 17-20 апреля 2018). – М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018, Т. 1. С. 138-139.

10. Агапов А.В., Ионов А.В., Селиверстов С.Д. Анализ влияния шероховатости, получаемой при селективном лазерном сплавлении на течение в каналах ГТД // 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2018»: тезисы (Москва, 19-23 ноября 2018). – М.: Типография «Люксор», 2018. С. 108.

11. Агапов А.В., Богданов В.Н., Ионов А.В., Селиверстов С.Д., Ионов А.В. Направления совершенствования малоразмерных газотурбинных двигателей // VI конгресс молодых ученых: сборник трудов конференции [Электронный ресурс]. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/5174/5174.pdf> (дата обращения 20.09.2021 г.)

12. Ионов А.В., Раихин К.В., Селиверстов С.Д., Талахов К.Д. Применение цифровых и аддитивных технологий в исследованиях двигателей ЛА // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы международной научно-технической конференции молодых ученых (Могилев, 26-27 октября 2017). – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2017. С. 28.