

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по науке

и цифровой трансформации

РГАТУ имени П.А. Соловьёва

канд. техн. наук, доцент

А.Н. Сутягин



### **Отзыв**

#### **ведущей организации**

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва»

на диссертационную работу Селиверстова Сергея Дмитриевича «Конструкторско-технологическое совершенствование обогреваемых лопаток входных направляющих аппаратов ГТД, получаемых методом селективного лазерного сплавления», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

**Диссертация Селиверстова Сергея Дмитриевича** посвящена конструкторско-технологическому совершенствованию лопаток входных направляющих аппаратов ГТД, получаемых методом селективного лазерного сплавления.

**Актуальность избранной темы.** Совершенствование элементов противообледенительной системы ГТД является актуальной задачей, которая позволит повысить топливную эффективность и запас мощности ГТД при выполнении полетов в условиях возможного обледенения. Наибольшее значение противообледенительная система имеет для вертолетных ГТД,

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

08.12.2024 г.

поскольку может находиться в активном режиме достаточно продолжительное время. Направления совершенствования противообледенительной системы лопаток входных направляющих аппаратов ГТД касаются оптимизации параметров системы, применения новых конструкционных материалов и/или технологий производства. Вместе с тем, конструктивные особенности полых лопаток ГТД вызывают сложности в проектировании и производстве таких изделий, что требует комплексного подхода к решению новых задач.

Так, в производстве деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок наиболее перспективной является технология селективного лазерного сплавления. Проведенный автором анализ показал, что, несмотря на положительный опыт применения данной технологии в отечественном и зарубежном производстве, существующие методики проектирования и программное обеспечение имеют недостаточно инструментов для проектирования изделий под аддитивное производство, при этом будущие эксплуатационные свойства изделий спрогнозировать невозможно. Также отсутствуют необходимые методики конструирования лопаток ГТД с внутренними полостями, учитывающие особенности материалов и технологии синтеза изделий при реализации процесса селективного лазерного сплавления.

Эти обстоятельства делают работу Селиверстова Сергея Дмитриевича, направленную на совершенствование обогреваемых лопаток ГТД, получаемых методом селективного лазерного сплавления, весьма актуальной.

**Связь работы с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства.** Государственная программа «Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 годы» устанавливает основные направления совершенствования авиационных двигателей военного и гражданского назначения, которая включает в себя требования по повышению их основных технических параметров, ресурса и надёжности. Разработанная автором методика проектирования и конструирования обогреваемых лопаток ГТД, получаемых методом селективного лазерного сплавления, может быть

использована для реализации новых изделий, а также при внедрении аддитивных технологий в производство.

**Целью работы** Селиверстова Сергея Дмитриевича является конструкторско-технологическое совершенствование обогреваемых лопаток ГТД, получаемых методом селективного лазерного сплавления. Решаемые автором задачи включали: проведение сравнительных экспериментальных исследований эксплуатационных и технических характеристик образцов, полученных традиционным способом и технологией селективного лазерного сплавления; разработку методики конструкторско-технологического совершенствования обогреваемых лопаток ВНА с противообледенительной системой за счет применения технологии селективного лазерного сплавления; разработку конструкции обогреваемой лопатки ВНА, обеспечивающей снижение расхода отбираемого для обогрева воздуха.

**Используемые автором методы** исследования соответствуют современному уровню, необходимому для конструкторско-технологического совершенствования узлов ГТД.

**Оценка новизны, практической значимости результатов диссертации и рекомендации по их использованию.** Новизна работы Селиверстова Сергея Дмитриевича состоит в том, что:

1. Для изделий из жаропрочной стали CL 20ES, изготавливаемых методом селективного лазерного сплавления, получены зависимости влияния углов установки изделий при печати на основные эксплуатационные и технические свойства.

2. Для обогреваемых лопаток ГТД, получаемых методом селективного лазерного сплавления, разработана методика проектирования и конструирования, которая учитывает анизотропию свойств после селективного лазерного сплавления.

3. Для обогреваемых лопаток ГТД разработана рациональная конструкция, которая учитывает анизотропию свойств после селективного лазерного сплавления.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в снижении расхода воздуха, отбираемого на работу противообледенительной системы; снижении числа итераций при разработке новых конструкций ГТД, получаемых методом селективного лазерного сплавления.

**Результаты исследований** Селиверстова Сергея Дмитриевича имеют практическую ценность для предприятий и организаций, занимающихся разработкой и эксплуатацией авиационных и наземных газотурбинных двигателей, таких как ПАО «ОДК-УМПО», АО «ОДК-Климов», АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «Кузнецов», ПАО «ОДК-Сатурн, ОКБ имени А.Люльки и других. Разработанная методика проектирования и конструирования обогреваемых лопаток ГТД, получаемых методом селективного лазерного сплавления, может быть использована для реализации новых изделий, а также при внедрении аддитивных технологий в производство.

**Достоверность и степень обоснованности** научных положений, выводов и заключений, выносимых на защиту, подтверждается корректным использованием законов природы, использованием сертифицированной исследовательской аппаратуры, апробированных методик, сравнением полученных результатов. Экспериментальные исследования проводились на сертифицированном оборудовании с использованием аттестованных средств измерений. Исследования вариантов конструкций обогреваемых лопаток осуществлялись с использованием коммерческого программного комплекса Ansys CFX.

**Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом, замечания по оформлению.** 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. Существенные замечания по оформлению отсутствуют.

**В первой главе** автором представлен анализ применения аддитивных технологий при изготовлении деталей авиационных ГТД. Проанализирован отечественный и зарубежный опыт применения аддитивных технологий,

основанных на трехмерной печати из металлопорошковых композиций. Показано, что 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.

**Во второй главе** автором проанализированы условия работы и эксплуатационные требования к обогреваемым лопаткам ВНА с противообледенительной системой. Объектом исследования является лопатка ВНА двигателя ТВ3-117. Показано, что традиционная технология изготовления лопатки ВНА с противообледенительной системой включает в себя множество трудоемких и длительных операций (изготовление металлических пресс-форм, последующие операции формовки оболочки, фрезерование внутренних каналов, пайку/сварку оболочек, финишную механическую и химическую обработку), которые предлагается заменить аддитивной технологией.

**В третьей главе** автором представлено обоснование выбора материалов, оборудования и методик исследований эксплуатационных характеристик. Представлено описание оборудования и материалов, используемых для изготовления образцов. Для изготовления аддитивных образцов применялся металлический порошок CL 20ES, использовалась СЛС-машина M2 Cusing (Concept Laser). Выполнялось сравнение с образцами, изготовленными традиционными методами из нержавеющей стали AISI 316L. Для исследования микроструктуры и элементного состава поверхностей аддитивного материала применялись методы сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа; проводились исследования на фреттинг-износ, усталостные испытания. Для оценки сопротивления синтезированного аддитивного порошка коррозионному износу были проведены сравнительные испытания на стойкость к питтинговой коррозии. Автором проводились испытания на теплопроводность для определения контактного термического сопротивления.

**Четвертая глава** посвящена анализу полученных результатов исследований эксплуатационных характеристик. Для синтезированного порошка CL 20ES автором получены зависимости влияния угла ориентации изделия в камере построения в процессе селективного лазерного сплавления на основные эксплуатационные характеристики: шероховатость поверхности, фреттинг-износ, коррозионный износ, эрозионный износ, теплопроводность. 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. Разработана регрессионная модель, позволяющая прогнозировать основные эксплуатационные характеристики изделий, получаемых методом селективного лазерного сплавления в зависимости от угла ориентации изделия в камере построения.

**В пятой главе** автор приводит методику конструкторско-технологического совершенствования обогреваемых лопаток ВНА с противообледенительной системой, получаемых методом селективного лазерного сплавления. Разработана методика проектирования и рекомендации по конструированию обогреваемых лопаток ВНА с противообледенительной системой, получаемых методом селективного лазерного сплавления. Полученная методика может служить методической рекомендацией для конструкторов и технологов при изготовлении деталей методом селективного лазерного сплавления, что позволит сократить число итераций при создании новых изделий, получаемых методом селективного лазерного сплавления. Методами математического моделирования получена модифицированная конструкция обогреваемой лопатки ВНА с противообледенительной системой, которая обеспечивает снижение расхода воздуха, отбираемого на обогрев лопатки и как следствие повышение характеристик двигательной установки.

**Замечания по диссертации.** Несмотря на достаточно высокий уровень, диссертационная работа не лишена недостатков, к которым можно отнести следующие:

1. В тексте диссертации имеют место отклонения от принятых норм представления формул в части выбора шрифта и написания подстрочных и надстрочных индексов.

2. В работе не упоминается о влиянии механической обработки на параметры поверхностного слоя образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления.

3. Строить аппроксимирующие зависимости для параметров материала по трём значениям углов ориентации образцов при печати (по трём точкам, а для этих целей их необходимо иметь более пяти) бессмысленно, если аппроксимируемая зависимость нелинейная.

4. Отсутствует оценка погрешности регрессионной модели свойств лопатки, полученной селективным лазерным сплавлением, в зависимости от угла ориентации в камере.

5. Проводить сравнение величины массового расхода горячего воздуха для различных конструкций обогреваемой лопатки следует при постоянном значении приведенной или осреднённой температуры поверхностей лопатки, а не по минимальной температуре, которая для различных конструкций лопатки находится на разных участках профиля, для которых нет информации о необходимости их обогрева с целью предотвращения обледенения.

6. Целесообразно представить результаты внедрения разработанной методики проектирования и конструирования обогреваемых лопаток ГТД, получаемых методом селективного лазерного сплавления,

Отмеченные недостатки не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы.

**Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати.** По теме диссертации автором опубликовано 12 работ, из

них 5 работ являются публикациями в рецензируемых научных изданиях и публикациями, приравненными к ним.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Диссертационная работа Селиверстова Сергея Дмитриевича выполнена на высоком научном уровне. Результатом работы является решение важной задачи актуального направления в сфере авиационного двигателестроения. Приведенные результаты можно классифицировать как новые, обоснованные и имеющие большое практическое и научное значение.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Селиверстов Сергей Дмитриевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Отзыв рассмотрен и единогласно утвержден на заседании кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», протокол № 3 от 30.11.2021 г.

Заведующий кафедрой  
"Авиационные двигатели"  
докт. техн. наук, профессор



А.Е. Ремизов

*С отзывом ознакомлен*  
13.12.2021 *А.Е. Ремизов / Селиверстов С.Д.*