

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального
директора АО НИАТ

д.т.н., профессор

 В.В. Плихунов
«20» _____ 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**Акционерного общества «Национальный институт авиационных
технологий» (АО НИАТ)**

на диссертационную работу Рыжкова Петра Валерьевича
«Усталостная долговечность жаропрочного никелевого сплава ВЖ159,
полученного методом селективного лазерного сплавления»
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
научной специальности 2.6.17 – «Материаловедение»

Актуальность темы диссертационной работы

Расширение номенклатуры деталей, изготавливаемых методами послойного синтеза металлических материалов, ставит задачу перехода от оценки технологической реализуемости аддитивного процесса к обоснованию надежности и ресурса получаемых изделий. Для жаропрочных никелевых сплавов эта задача особенно значима, поскольку детали из них работают в условиях сочетания повышенных температур, циклических нагрузок и локальных концентраций напряжений. При селективном лазерном сплавлении эксплуатационные характеристики определяются не только объемными свойствами материала, но и технологической наследственностью поверхностного слоя, формируемой непосредственно в процессе построения.

К числу факторов такой технологической наследственности относятся микрогеометрия поверхности, приповерхностная пористость, особенности кристаллического строения и ориентация элементов относительно направления

построения. Для деталей сложной формы отдельные участки могут формироваться под неблагоприятными углами к платформе построения, вследствие чего состояние поверхности и локальная дефектность становятся неоднородными по объему изделия. В этих условиях применение традиционных характеристик усталости, полученных на механически обработанных образцах, не всегда обеспечивает корректную оценку долговечности реальной аддитивно изготовленной детали.

Диссертационная работа Рыжкова П.В. направлена на установление закономерностей влияния структурного состояния и технологической шероховатости поверхностного слоя на усталостную долговечность сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления, а также на разработку методов ее прогнозирования. Постановка исследования соответствует практическим задачам технологической подготовки производства, квалификации аддитивных процессов и ресурсного обоснования деталей, поэтому тема диссертации является актуальной как для материаловедения, так и для авиационного технологического производства.

Общая характеристика, структура и содержание диссертации

Диссертационная работа изложена на 144 страницах, включая 119 страниц основного текста, содержит 109 рисунков и 24 таблицы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, перечня сокращений и списка использованных источников, включающего 97 наименований. По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ в рецензируемых журналах, из которых 5 опубликованы в изданиях, включенных в перечень ВАК, и 4 индексируются в международных базах Scopus и Web of Science.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и личном вкладе автора. Цель работы заключается в установлении закономерностей влияния

структурного состояния материала и параметров технологической шероховатости поверхностного слоя на усталостную долговечность сплава ВЖ159 и в разработке методов ее прогнозирования.

Первая глава содержит аналитический обзор исследований по статическому и циклическому нагружению металлических материалов, влиянию дефектов селективного лазерного сплавления на конструкционную прочность, энергетическим критериям усталостного разрушения и чувствительности материала к концентрации напряжений. Рассмотрено применение механики разрушения к оценке предельно допустимых дефектов и выполнен анализ существующих подходов к численному моделированию поврежденности синтезированных материалов. В результате автор обосновывает необходимость расчетного подхода, учитывающего реальное состояние поверхностного слоя и стадийный характер усталостного разрушения.

Во второй главе приведены сведения об объекте исследования, геометрии образцов и примененном экспериментальном оборудовании. Использован комплекс методов, включающий статические и циклические механические испытания, испытания на длительную прочность и циклическую трещиностойкость, профилометрию, оптическую и растровую электронную микроскопию, фрактографический анализ. Совокупность примененных методов позволяет связать параметры технологического процесса с состоянием поверхности, механическим поведением и фактическими механизмами разрушения.

В третьей главе представлена основная часть экспериментальных и расчетных результатов. Исследована адаптация сплава ВЖ159 к технологии селективного лазерного сплавления, проанализировано влияние режимов формирования поверхности и ее пространственной ориентации, определен комплекс механических характеристик. Установлено, что диапазон углов наклона поверхностей $35\text{--}55^\circ$ является критическим с точки зрения качества их

формирования, а угол около 55° соответствует пороговому условию перехода к стабильному формированию поверхностного слоя. Показано, что при применении высокоэнергетического контура может быть сформирована поверхность с технологической шероховатостью порядка $Ra \approx 4\text{--}8$ мкм.

Для описания циклического поведения материала автором параметрически идентифицирована модель упругопластического деформирования с комбинированным изотропным и кинематическим упрочнением. Идентификация параметров по экспериментальным петлям гистерезиса выполнена с использованием метода Левенберга–Марквардта. Полученная модель использована при расчетах локального напряженно-деформированного состояния в областях концентрации напряжений.

Значительная часть исследования посвящена формированию двухстадийной расчетной схемы усталостной долговечности. Стадия зарождения трещины оценивается с применением энергетического критерия PSWT, а последующий устойчивый рост описывается на основе J-интеграла и кинетического уравнения Пэриса. Верификация проведена для гладких образцов, образцов с концентраторами С-, U- и V-типа, а также для тонкостенных образцов с исходной технологической поверхностью. Расчетная долговечность согласуется с медианными экспериментальными данными с погрешностью не более 24 %, а при моделировании случайных профилей шероховатости отклонение относительно медианных экспериментальных кривых не превышает 20 %.

Фрактографические исследования использованы не как вспомогательный, а как верифицирующий инструмент. Автор сопоставляет расчетные области максимальной повреждаемости с фактическими очагами разрушения, анализирует особенности приповерхностного слоя, размеры очаговых участков и признаки перехода к устойчивому росту трещины. Показано, что технологическая шероховатость и приповерхностная газовая пористость являются основными факторами снижения циклической долговечности сплава ВЖ159 при

температурах до 650 °С. Вместе с тем повышенная исходная шероховатость не приводит к заметному снижению длительной прочности при 800–1000 °С.

Научная новизна, обоснованность и достоверность результатов

Наиболее существенным научным результатом диссертационной работы является разработка и экспериментальная проверка двухстадийной модели прогнозирования усталостной долговечности образцов из сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления. В отличие от подходов, в которых весь ресурс описывается одной эмпирической зависимостью, предложенная модель физически разделяет процесс на зарождение микротрещины в зоне технологической шероховатости и ее последующий устойчивый рост.

Научной новизной обладает установленная связь между углом наклона формируемой поверхности и качеством поверхностного слоя. Выделение критического диапазона 35–55° и порогового условия около 55° имеет значение не только для оценки шероховатости конкретных образцов, но и для понимания технологической наследственности при построении элементов сложной формы. Автором также установлено влияние мелкозернистого приповерхностного слоя и газовой пористости на зарождение и развитие усталостных микротрещин и подтвержден стадийный характер разрушения по фрактографическим признакам.

Отдельно следует отметить получение параметров упругопластической модели циклического деформирования с комбинированным упрочнением и применение алгоритма Левенберга–Марквардта для их идентификации. Такой подход обеспечивает воспроизведение стабилизированных петель гистерезиса и дает расчетную основу для определения локальных параметров напряженно-деформированного состояния в концентраторах различной формы.

Достоверность результатов обеспечивается применением взаимодополняющих методов исследования и испытаний, сопоставлением результатов численного моделирования с экспериментальными данными, а также анализом поверхностей разрушения. Верификация выполнена для нескольких

типов образцов и разных состояний поверхности, что повышает обоснованность выводов о применимости предложенной расчетной схемы. Основные результаты апробированы на научных конференциях и отражены в публикациях по теме диссертации.

Значимость результатов для науки и производства

Научная значимость работы состоит в развитии представлений о роли технологической наследственности поверхностного слоя в усталостном разрушении материалов аддитивного производства. Показано, что для оценки ресурса необходимо учитывать не только номинальный уровень нагружения и объемные механические характеристики, но и локальную геометрию поверхности, приповерхностную дефектность, форму фронта трещины и стадийность процесса разрушения.

С производственной точки зрения результаты работы представляют интерес для технологической подготовки и сопровождения изготовления деталей методом селективного лазерного сплавления. Полученные данные о критическом диапазоне углов наклона поверхностей и характерном уровне технологической шероховатости могут использоваться при выборе ориентации детали на платформе, назначении локальной механической обработки и определении участков, требующих повышенного контроля. Предложенная расчетная схема может применяться для сравнительной оценки вариантов конструкции и технологического исполнения с учетом реального состояния поверхности.

Практическая направленность работы подтверждается использованием результатов при подготовке нормативно-методических материалов, в том числе стандарта организации СТО 1-595-33-619-2021, регламентирующего проведение испытаний и обработку данных образцов от изделий аддитивного производства.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы целесообразно использовать в АО «НИАТ» при развитии методик технологической оценки процессов послойного синтеза, исследований влияния лазерных технологий на структуру и прочностные характеристики материала, а также при подготовке нормативно-технологической документации по квалификации аддитивных процессов. Особый интерес представляют результаты, связывающие характеристики технологической шероховатости поверхности с локальным напряженно-деформированным состоянием и усталостной долговечностью образцов из сплава ВЖ159.

Методику прогнозирования усталостной долговечности и результаты по влиянию шероховатости и приповерхностной пористости рекомендуется учитывать в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, АО «ОДК-Климов», АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «ОДК-УМПО», АО «Композит», ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», а также в других организациях, выполняющих разработку, квалификацию и ресурсное обоснование деталей из жаропрочных никелевых сплавов, получаемых аддитивными технологиями. Расчетный подход также может быть полезен при формировании программ испытаний и требований к контролю поверхностного слоя изделий сложной геометрии.

Соответствие диссертации научной специальности

Содержание диссертации соответствует научной специальности 2.6.17 – Материаловедение. Работа включает установление закономерностей влияния технологии получения, структуры, состояния поверхности и эксплуатационных факторов на физико-механические свойства и долговечность металлического материала; исследование критериев разрушения при циклических нагрузках; развитие методов механических испытаний и фрактографического анализа; компьютерную реализацию моделей циклического деформирования и распространения трещин; разработку методов прогнозирования усталостной

долговечности и остаточного ресурса материалов, предназначенных для работы при повышенных температурах.

Замечания и вопросы по диссертационной работе

1. Полученные в работе значения критического диапазона углов наклона $35\text{--}55^\circ$ и порогового угла около 55° установлены для конкретного комплекса оборудования, режимов экспонирования и порошкового материала. В диссертации следовало бы более подробно обозначить границы переноса этих результатов на установки с иной оптической схемой, толщиной слоя, стратегией сканирования и системой газодинамического обеспечения рабочей камеры.
2. В работе показана эффективность высокоэнергетического контура для формирования поверхности с шероховатостью $R_a \approx 4\text{--}8$ мкм. Вместе с тем недостаточно подробно рассмотрено, как изменение режима поверхностного контура влияет одновременно на производительность построения, глубину переплавления и возможное формирование приповерхностных дефектов. Для практического назначения режима такой анализ представляется полезным.
3. Технологическая шероховатость рассматривается как важнейший параметр усталостной долговечности, при этом для расчетной модели используется локальная геометрия профиля. Представляло бы интерес сформулировать минимальный набор параметров контроля поверхности, который может быть применен непосредственно в производственной практике для выбора репрезентативного профиля и последующей расчетной оценки ресурса.
4. Влияние шероховатости, приповерхностной газовой пористости, структурной неоднородности и остаточных напряжений в реальной детали проявляется совместно. В работе наиболее подробно исследованы первые два фактора. Следовало бы более четко обозначить возможное влияние остаточных напряжений после селективного лазерного сплавления и термической обработки на применимость полученной расчетной схемы.

5. Верификация модели выполнена на лабораторных образцах при заданных схемах изотермического циклического нагружения. Для дальнейшего внедрения методики в ресурсное обоснование деталей целесообразно оценить ее применимость при многоосном и термомеханическом нагружении, характерном для реальных элементов высокотемпературных конструкций.

6. В работе сформированы рекомендации по учету углов наклона, состояния поверхностного слоя и локальной усталостной повреждаемости, однако они не сведены в единый инженерный алгоритм принятия решения о необходимости механической обработки или допустимости сохранения технологической поверхности. Такая формализация повысила бы практическую ценность результатов для технолога и конструктора.

Приведенные замечания носят дискуссионный и рекомендательный характер, не ставят под сомнение достоверность основных результатов и не снижают научной и практической значимости выполненной работы.

Заключение

Диссертационная работа Рыжкова Петра Валерьевича «Усталостная долговечность жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача установления закономерностей усталостного разрушения жаропрочного никелевого сплава, полученного аддитивным методом, и разработана расчетно-экспериментальная методика прогнозирования долговечности с учетом технологической шероховатости, приповерхностной дефектности и локальных концентраторов напряжений.

Работа характеризуется внутренним единством, последовательностью постановки и решения задач, достаточным объемом экспериментальных и расчетных исследований. Полученные результаты обладают научной новизной, обоснованы экспериментальными данными и имеют практическое значение для

развития технологий послойного синтеза, испытательного сопровождения и ресурсного обоснования изделий из жаропрочных никелевых сплавов. Содержание автореферата и публикаций соответствует основным положениям диссертации.

По актуальности, научной новизне, достоверности и обоснованности результатов, их значимости для науки и производства диссертационная работа соответствует критериям, установленным пп. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Рыжков Петр Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.17 – «Материаловедение».

Дата рассмотрения и утверждения отзыва

Отзыв на диссертационную работу Рыжкова П.В. рассмотрен, обсужден и утвержден на заседании Научно-технического совета Акционерного общества «Национальный институт авиационных технологий» (АО НИАТ), протокол № 5 от «12» октября 2026 г. Решение об утверждении отзыва принято единогласно.

Заместитель генерального директора по
научно-исследовательской
деятельности, к.т.н.

 А.В. Коваленко

Начальник Отдела-1650, к.т.н.

 А.И. Чудайкин

Акционерное общество «Национальный институт авиационных технологий»

Адрес: 117587, г. Москва, ул. Кировоградская, д. 3

Тел.: +7 (495) 312-11-49

Электронная почта: avk@niat.ru

Сайт: www.niat.ru