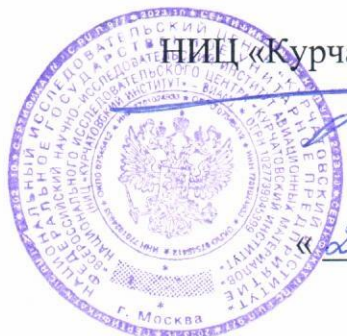


«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ

С.В. Яковлев



«26» 05 2026 г.

М.П.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного унитарного предприятия
«Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Диссертация Рыжкова Петра Валерьевича на тему «Усталостная долговечность жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления» выполнена в лаборатории № 633 «Прочность и надежность материалов авиационных двигателей и силовых энергетических установок» Испытательного центра федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ).

В период подготовки диссертации соискатель Рыжков Петр Валерьевич работал в НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ в лаборатории № 633 «Прочность и надежность материалов авиационных двигателей и силовых энергетических установок» в должности научного сотрудника.

Рыжков Петр Валерьевич, 1990 года рождения, в 2016 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)» по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов». В 2018 году окончил федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов». В 2026 году окончил аспирантуру федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по научной специальности 2.6.17. Материаловедение.

Научный руководитель – Горбовец Михаил Александрович, кандидат технических наук, начальник Испытательного центра НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы.

Диссертационная работа Рыжкова П.В. является научно-квалификационной работой, в которой решены важные научно-практические задачи, связанные с установлением закономерностей влияния структурного состояния материала, технологической шероховатости и геометрии поверхностного слоя на усталостную долговечность жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления (СЛС), а также с разработкой расчетной методики прогнозирования долговечности.

1. Исследовано влияние параметров СЛС, пространственной ориентации и геометрических особенностей формируемых поверхностей на микроструктуру, пористость и технологическую шероховатость образцов из сплава ВЖ159.

2. Установлено, что углы наклона элементов формы в диапазоне 35–55° являются критическими с точки зрения качества поверхностного слоя: при уменьшении угла усиливается деградация нижних поверхностей, связанная с подплавлением порошка и формированием дефектной структуры, тогда как при

углах более 55° обеспечивается стабильное формирование структуры и поверхности.

3. По результатам механических испытаний и фрактографического анализа выявлен двухстадийный характер усталостного разрушения: зарождение микротрещин в зоне технологической шероховатости и приповерхностных дефектов, а затем устойчивый рост трещины по основному объему материала.

4. Разработана и параметрически идентифицирована упругопластическая модель циклического деформирования сплава ВЖ159 с комбинированным изотропно-кинетическим упрочнением, позволяющая воспроизводить стабилизированные петли гистерезиса при различных амплитудах деформации.

5. Разработана двухстадийная методика прогнозирования усталостной долговечности, объединяющая энергетический критерий P_{SWT} для стадии зарождения трещины и расчет на основе J -интеграла и уравнения Пэриса для стадии устойчивого роста трещины.

6. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных для образцов различной геометрии и состояния поверхности; показано, что расчетная долговечность согласуется с медианными экспериментальными данными с погрешностью не более 24 % и находится в пределах экспериментального разброса порядка $\pm 2\sigma$.

Полученные результаты направлены на развитие методов оценки усталостной долговечности деталей авиационных и энергетических установок, изготавливаемых из жаропрочных никелевых сплавов аддитивными технологиями, и позволяют учитывать влияние шероховатости, локальных концентраторов напряжений, геометрии и стадии роста трещин при расчетах ресурса.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.

Личный вклад соискателя состоит в постановке и решении задач диссертационного исследования, анализе научно-технической литературы, планировании и проведении экспериментальных исследований, обработке результатов механических испытаний и фрактографического анализа, построении и параметрической идентификации упругопластической модели циклического деформирования, выполнении численного моделирования напряженно-деформированного состояния и расчетов усталостной долговечности, сопоставлении расчетных и экспериментальных данных, а также подготовке публикаций и докладов по теме диссертации.

Соискателем выполнен анализ влияния технологической шероховатости, пространственной ориентации поверхностей и приповерхностной газовой пористости на зарождение и развитие усталостных трещин; сформулированы основные положения двухстадийной модели усталостного разрушения и подготовлены выводы диссертационной работы.

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обеспечены применением современных методов исследования структуры и поверхности материала, использованием сертифицированного испытательного оборудования, проведением механических испытаний при различных условиях нагружения, фрактографическим анализом разрушенных образцов, а также сопоставлением расчетных результатов с экспериментальными данными.

Параметры модели циклического деформирования определены на основе экспериментальных кривых нагружения с применением алгоритма оптимизации Левенберга–Марквардта. Проверка адекватности расчетного подхода выполнена для образцов различной геометрии, включая гладкие образцы, образцы с концентраторами напряжений и конструктивно-подобные тонкостенные образцы с исходной шероховатостью поверхности.

Дополнительным подтверждением достоверности служит согласование расчетных результатов с фрактографическими признаками усталостного разрушения: областями зарождения микротрещин, фасетками скола, зонами устойчивого роста трещины, микрорельефом долома и участками торможения коротких трещин в приповерхностной мелкозернистой зоне.

Новизна результатов проведенных исследований.

1. Разработана двухстадийная модель прогнозирования усталостной долговечности образцов жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, полученного методом СЛС, учитывающая зарождение микротрещин в зоне технологической шероховатости и устойчивый рост трещин с применением энергетического критерия P_{SWT} , J -интеграла и уравнения Пэриса.

2. Предложен метод идентификации параметров упругопластической модели с комбинированным изотропно-кинематическим упрочнением, основанный на обработке экспериментальных кривых циклического нагружения и применении алгоритма оптимизации Левенберга–Марквардта.

3. Установлено, что углы наклона элементов формы в диапазоне $35\text{--}55^\circ$ являются критическими для формирования качества поверхностного слоя при СЛС; при угле около 55° обеспечивается пороговое условие сохранения требуемой морфологии поверхности, а при меньших углах возрастает вероятность образования дефектной приповерхностной структуры.

4. Показано влияние мелкозернистого поверхностного слоя и газовой пористости на кинетику зарождения и распространения микротрещин, а также на изменение характеристик циклической прочности сплава ВЖ159.

5. Впервые для аддитивного жаропрочного никелевого сплава ВЖ159 реализован комплексный подход к проверке расчетной модели усталостного разрушения, основанный на сопоставлении расчетной долговечности не только с макроскопическими результатами испытаний, но и с количественными фрактографическими признаками разрушения.

6. Предложен подход к моделированию случайных профилей шероховатости, позволяющий при отсутствии полного набора экспериментальных профилометрических данных воспроизводить статистически эквивалентное влияние локальной геометрии поверхности на усталостную долговечность.

Практическая значимость проведенных исследований.

На основе выполненных исследований получены следующие практические результаты:

1. Получены и обобщены данные о режимах СЛС, при которых формируется поверхностный слой с технологической шероховатостью порядка $R_a = 4\text{--}8$ мкм и характерным уровнем приповерхностной газовой пористости в зоне сплавления.

2. Разработана расчетная схема оценки усталостной долговечности жаропрочного сплава ВЖ159 с использованием энергетического критерия малоциклового усталости PSWT, J-интеграла и уравнения Пэриса, что позволяет учитывать влияние шероховатости, локальных концентраторов напряжений и геометрии образцов при проектировании элементов конструкций.

3. Сформированы рекомендации по проектированию и расчету элементов, изготавливаемых методом СЛС, с учетом критического угла наклона поверхностей $35\text{--}55^\circ$ и требований к сохранению прочностных характеристик поверхностного слоя.

4. Показано, что технологическая шероховатость и приповерхностная газовая пористость являются основными факторами снижения циклической долговечности сплава ВЖ159 при температурах до 650°C , при этом повышенная исходная шероховатость не приводит к заметному снижению длительной прочности при $800\text{--}1000^\circ\text{C}$.

5. Разработанные результаты и расчетные подходы использованы при подготовке и актуализации нормативно-методических материалов: СТО 1-595-

33-619-2021, регламентирующего требования к образцам, изготовленным методом СЛС из жаропрочных никелевых сплавов для определения физико-механических характеристик; методик ММ 1.2.223-2021 и ММ 1.2.231-2022, регламентирующих порядок проведения испытаний и обработки данных для построения кинетической диаграммы усталостного разрушения и определения порогового коэффициента интенсивности напряжений.

Материалы диссертационного исследования могут быть использованы при разработке нормативно-технической документации, назначении режимов испытаний, оценке ресурса и расчетном сопровождении деталей авиационных и энергетических установок, изготавливаемых из жаропрочных никелевых сплавов с применением аддитивных технологий.

Ценность научных работ соискателя.

Ценность научных работ соискателя заключается в установлении причинно-следственных связей между технологическими параметрами СЛС, состоянием поверхностного слоя, микроструктурной неоднородностью, пористостью и усталостной долговечностью жаропрочного никелевого сплава ВЖ159.

Разработанная двухстадийная методика позволяет количественно оценивать вклад стадии зарождения микротрещины и стадии ее устойчивого роста, а также учитывать влияние локальной геометрии шероховатой поверхности на расчетную долговечность. Полученные результаты расширяют научные представления о механизмах усталостного разрушения аддитивных жаропрочных никелевых сплавов и имеют практическую направленность для расчетов ресурса конструктивно-подобных образцов и деталей.

Соответствие пунктам паспорта научной специальности.

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 2.6.17. Материаловедение. Соответствие определяется тем, что в работе исследованы закономерности влияния структуры, технологии

селективного лазерного сплавления и состояния поверхностного слоя на физико-механические и эксплуатационные свойства жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, установлены особенности усталостного разрушения при механическом и температурном воздействии, применены современные методы исследования структуры и свойств материала, а также реализовано математическое моделирование и прогнозирование усталостной долговечности.

Содержание диссертации соответствует следующим направлениям исследований паспорта научной специальности 2.6.17. Материаловедение:

П. 1. «Разработка новых металлических, неметаллических и композиционных материалов, в том числе капиллярно-пористых, с заданным комплексом свойств путем установления фундаментальных закономерностей влияния дисперсности, состава, структуры, технологии, а также эксплуатационных и иных факторов на функциональные свойства материалов. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры металлических, неметаллических материалов и композитов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности деталей, изделий, машин и конструкций».

П. 5. «Установление закономерностей и критериев оценки разрушения металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий от действия механических нагрузок и внешней среды».

П. 6. «Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий».

П. 8. «Разработка и компьютерная реализация математических моделей физико-химических, гидродинамических, тепловых, хемореологических,

фазовых и деформационных превращений при производстве, обработке, переработке и эксплуатации различных металлических, неметаллических и композиционных материалов. Создание цифровых двойников технологических процессов, а также разработка специализированного оборудования».

П. 13. «Развитие методов прогнозирования и оценка остаточного ресурса металлических, неметаллических и композиционных материалов».

П. 16. «Создание металлических, неметаллических и композиционных материалов, способных эксплуатироваться в экстремальных условиях: агрессивные среды, электрические и магнитные поля, повышенные температуры, механические нагрузки, вакуум и др.».

Таким образом, диссертационная работа соответствует указанным пунктам паспорта специальности, поскольку в ней установлены связи между технологией СЛС, структурным состоянием, шероховатостью и дефектностью поверхностного слоя сплава ВЖ159, исследованы механизмы усталостного разрушения, разработана двухстадийная расчетная методика прогнозирования долговечности и выполнена ее проверка по экспериментальным данным.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

Основные результаты диссертационной работы Рыжкова П.В. опубликованы в 9 научных работах в рецензируемых журналах, из которых 5 включены в перечень ВАК при Минобрнауки России, 4 включены в международные базы данных Scopus и Web of Science и отражают основное содержание диссертационного исследования.

Список основных трудов по теме диссертации, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Рыжков П. В., Горбовец М. А., Ходинев И. А. Энергетический критерий усталостного разрушения жаропрочного никелевого сплава // Труды ВИАМ. – 2023. – № 11(129). – С. 111–122. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-111-122.

2. Горбовец М. А., Ходинев И. А., Рыжков П. В. Малоцикловая усталость при высоких температурах жаропрочного никелевого сплава, полученного селективным лазерным сплавлением // *Авиационные материалы и технологии*. – 2019. – № 4(57). – С. 65–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-65-73.

3. Рыжков П. В., Горбовец М. А., Ходинев И. А. Определение параметров модели пластичности при циклическом нагружении жаропрочного никелевого сплава при повышенной температуре // *Авиационные материалы и технологии*. – 2025. – № 1(78). – С. 72–87. DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-72-87.

4. Рыжков П. В., Горбовец М. А. Применение энергетического критерия для оценки усталостной долговечности никелевого сплава, полученного селективным лазерным сплавлением // *Труды ВИАМ*. – 2025. – № 12(154). – С. 149–169.

5. Рыжков П. В., Горбовец М. А. Численная модель прогнозирования усталостной долговечности в условиях исходной шероховатости поверхности никелевого сплава, полученного с помощью аддитивных технологических процессов // *Труды ВИАМ*. – 2026. – № 3(157). – С. 183–202.

Публикации, индексируемые базами данных Scopus и Web of Science:

1. Ryzhkov P. V., Khodinev I. A., Monin S. A. Studies on Fatigue Crack Growth Rate in Heat-Resistant Nickel Alloys // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2021. – Vol. 12, No. 6. – P. 1499–1510. DOI: 10.1134/S2075113321060198.

2. Ryzhkov P. V., Suhov D. I., Hodinev I. A., Monin S. A. High Temperature Low Cycle Fatigue of Co–Cr–Ni–W–Ta Heat Resistant Alloy Produced by Additive Technological Processes // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2022. – Vol. 13, No. 6. – P. 1719–1726. DOI: 10.1134/s2075113322060211.

3. Gorbovets M. A., Hodinev I. A., Ryzhkov P. V. Application of Statistical Criteria for Checking the Homogeneity of Dispersions of Results of Fatigue Tests of Heat-Resistant Alloys Produced by Selective Laser Melting // *Polymer Science, Series D*. – 2023. – Vol. 16, No. 2. – P. 427–434. DOI: 10.1134/s1995421223020107.

4. Ryzhkov P. V., Koshelev A. V., Karashaev M. M. Microstructural Effects of Heat-Resistant Nickel Alloys on the Rate of Fatigue Crack Growth // Steel in Translation. – 2025. – Vol. 55, No. 1. – P. 36–44. DOI: 10.3103/S0967091225700238.

Апробация работы.

Материалы диссертационной работы докладывались на 4 всероссийских и 1 международной научных конференциях:

– XI Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Физико-механические испытания, прочность, надежность, высокотемпературные испытания», посвященная 105-летию со дня рождения д.т.н., профессора С.И. Кишкиной (Москва, 2019);

– Всероссийская научно-техническая конференция «Современные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их производства» (Москва, 2021);

– VII Международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (Москва, 2021);

– XIV Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Физико-механические испытания, прочность и надежность современных конструкционных и функциональных материалов» (Москва, 2022);

– XVII Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Физико-механические испытания, прочность, надежность современных конструкционных и функциональных материалов» (Москва, 2025).

Текст диссертации был проверен на использование заимствованного материала без ссылки на авторов и источники заимствования. После исключения всех корректных совпадений иных заимствований не обнаружено.

Диссертационная работа Рыжкова Петра Валерьевича рекомендуется к публичной защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.17. Материаловедение.

Заключение принято на заседании Испытательного центра.

Присутствовало на заседании – 12 человек, в том числе с правом голоса – 12, из них докторов наук – 2, кандидатов наук – 10.

Результаты голосования: «за» – 12, «против» – нет, «воздержались» – нет.

Протокол № 20 от «26» мая 2026 г.

Председательствующий на заседании:

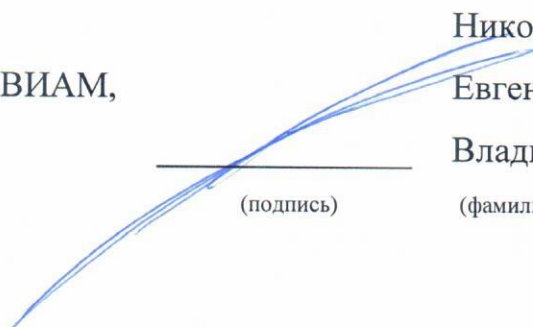
Заместитель начальника

Испытательного центра

НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ,

к.т.н.

(должность)



(подпись)

Николаев

Евгений

Владимирович

(фамилия, имя, отчество)

