

На правах рукописи

РЫЖКОВ ПЕТР ВАЛЕРЬЕВИЧ

**УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА
ВЖ159, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО
СПЛАВЛЕНИЯ**

2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

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

Официальные оппоненты: **Гусев Дмитрий Евгеньевич,**
доктор технических наук, доцент, профессор образовательного центра института № 11, старший научный сотрудник лаборатории материаловедения ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Тихомирова Елена Александровна,
кандидат технических наук, начальник испытательной лаборатории по исследованию деталей и узлов ИЦЗЛ службы главного металлурга АО «ОДК-Климов»

Ведущая организация: Акционерное общество «Национальный институт авиационных технологий» (АО «НИАТ»)

Защита диссертации состоится **«19» ноября 2026** года в **14:00** часов на заседании диссертационного совета 31.1.002.01 при НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ по адресу: 105005, Россия, г. Москва, ул. Радио, д. 17. Тел.: +7 (499) 261-86-77. Факс: +7 (499) 267-86-09. E-mail: admin@viam.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ и на сайте www.viam.ru.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

М.А. Горбовец

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Применение селективного лазерного сплавления (СЛС) при использовании жаропрочных никелевых сплавов, таких как ВЖ159, позволяет изготавливать элементы сложной формы для авиационных и энергетических установок. Однако процессы формирования структуры и дефектности при СЛС существенно влияют на ресурс изделий. Особое значение имеет технологическая шероховатость поверхности и наличие пористости, которые формируют зоны локальных концентраций напряжений и ускоряют зарождение усталостных трещин. Разработка надёжных методов численного прогноза ресурса таких изделий является актуальной научной задачей, направленной на развитие методов моделирования поврежденности конструкционных материалов, получаемых аддитивными технологиями.

Целью работы является установление закономерностей влияния структурного состояния материала и параметров технологической шероховатости поверхностного слоя на усталостную долговечность жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления, и разработка методов её прогнозирования.

Задачи диссертационной работы:

1. Исследовать влияние параметров селективного лазерного сплавления, пространственной ориентации и геометрических особенностей формируемых поверхностей сплавления на микроструктуру и технологическую шероховатость образцов из сплава ВЖ159.
2. Экспериментально установить закономерности деформирования и усталостного разрушения материала по результатам механических испытаний и фрактографического анализа.
3. Разработать и параметрически идентифицировать модель упругопластического поведения материала с комбинированным упрочнением.
4. Разработать методику прогнозирования усталостной долговечности на основе J -интеграла и энергетического критерия P_{SWT} .
5. Провести верификацию расчётных результатов по экспериментальным данным для образцов различной геометрии и шероховатости.

Научная новизна работы

1. Разработана двухстадийная модель прогнозирования усталостной долговечности образцов из жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, полученных методом селективного лазерного сплавления. Модель учитывает стадию зарождения микротрещин в зоне технологической шероховатости с использованием энергетического критерия $PSWT$

и стадию устойчивого роста трещины на основе J-интеграла и кинетического уравнения Пэриса.

2. Предложен метод идентификации параметров упругопластической модели циклического деформирования с комбинированным изотропно-кинетическим упрочнением, основанный на обработке экспериментальных кривых циклического нагружения с применением алгоритма Левенберга–Марквардта.

3. Установлены закономерности влияния угла наклона поверхностей, режимов сплавления и состояния поверхностного слоя на формирование технологической шероховатости, газовой пористости и морфологии кристаллитов в образцах из сплава ВЖ159. Показано, что диапазон углов $35\text{--}55^\circ$ является критическим с точки зрения качества формируемой поверхности, а угол около 55° соответствует пороговому условию стабильного формирования поверхностного слоя.

4. Показано влияние мелкозернистого приповерхностного слоя и газовой пористости на зарождение и развитие усталостных микротрещин. Установлено, что при циклическом нагружении разрушение имеет выраженный стадийный характер: первая стадия связана с образованием фасеток скола, вторая — с устойчивым ростом трещины и формированием бороздчатого рельефа.

5. Реализован комплексный подход к проверке адекватности модели усталостного разрушения, основанный на сопоставлении расчётных данных с экспериментальной долговечностью, формой очага разрушения, размерами фасеток и фрактографическими признаками роста трещины.

Практическая значимость:

1. Определены режимы селективного лазерного сплавления, при которых формируется поверхностный слой сплава ВЖ159 с технологической шероховатостью порядка $R_a \approx 4\text{--}8$ мкм и характерным уровнем приповерхностной газовой пористости.

2. Установлено, что угол наклона поверхности около 55° является пороговым для стабильного формирования поверхностного слоя. При углах менее 55° наблюдается деградация нижних поверхностей, связанная со сквозным проплавлением и подплавлением порошка, что необходимо учитывать при проектировании изделий, получаемых методом СЛС.

3. Предложена расчётная схема оценки усталостной долговечности образцов из сплава ВЖ159 с использованием энергетического критерия PSWT, J-интеграла и кинетического уравнения Пэриса. Схема позволяет учитывать влияние технологической шероховатости, локальных концентраторов напряжений и геометрии фронта трещины.

4. Показано, что технологическая шероховатость и приповерхностная газовая пористость являются основными факторами снижения циклической долговечности сплава ВЖ159 при температурах до 650 °С. При этом повышенная исходная шероховатость не приводит к заметному снижению длительной прочности при температурах 800–1000 °С.

5. Сформированы рекомендации по расчёту и проектированию изделий из сплава ВЖ159, получаемых методом СЛС, с учётом критического диапазона углов наклона поверхностей 35–55°, состояния поверхностного слоя и необходимости оценки локальной усталостной повреждаемости.

6. Результаты диссертационной работы и разработанные расчётные подходы использованы при подготовке нормативно-методических материалов, в том числе стандарта организации СТО 1-595-33-619-2021, регламентирующего проведение испытаний и обработку экспериментальных данных для построения кинетической диаграммы усталостного разрушения и определения порогового коэффициента интенсивности напряжений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлены количественные закономерности формирования качества поверхностного слоя при СЛС никелевого сплава ВЖ159: диапазон углов наклона поверхностей 35–55° является критическим с точки зрения качества формируемой поверхности, а угол около 55° соответствует пороговому условию перехода к стабильному формированию поверхностного слоя; показано, что применение высокоэнергетического контура позволяет формировать поверхность с технологической шероховатостью уровня $R_a \approx 4\text{--}8$ мкм; определены характер и роль газовой пористости и мелкозернистого приповерхностного слоя.

2. Экспериментально обоснована стадийность усталостного разрушения образцов с различным состоянием поверхности и концентраторами напряжений; показано, что исходная шероховатость и газовая пористость являются доминирующими факторами снижения усталостной долговечности при температурах до 650 °С; выделены фрактографические признаки стадий зарождения и устойчивого роста трещин.

3. Разработана упругопластическая модель циклического деформирования с комбинированным изотропно-кинематическим упрочнением для сплава ВЖ159, полученного методом СЛС, и выполнена идентификация параметров по экспериментальным данным с применением метода Левенберга–Марквардта, обеспечивающая воспроизведение стабилизированных петель гистерезиса.

4. Реализована двухстадийная расчётная схема прогнозирования усталостной долговечности, включающая стадию зарождения по энергетическому критерию P_{SWT} и

стадию роста трещины на основе J -интеграла с использованием кинетического уравнения Пэриса; показана применимость схемы для различных геометрий и состояний поверхности.

5. Выполнена проверка адекватности (верификация) расчётной схемы для образцов с концентраторами С-, U- и V-типа, а также для образцов с исходной шероховатостью; обеспечено согласование расчётной долговечности с экспериментальными медианными значениями.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на 4 всероссийских и 1 международной научных конференциях, посвящённых физико-механическим испытаниям, прочности, надёжности конструкционных материалов, высокотемпературным испытаниям, аддитивным технологиям и современным жаропрочным никелевым сплавам.

Материалы диссертации докладывались на следующих научных конференциях:

— XI Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Физико-механические испытания, прочность, надёжность, высокотемпературные испытания», посвящённой 105-летию со дня рождения д.т.н., профессора Софьи Исааковны Кишкиной (Москва, 2019);

— Всероссийской научно-технической конференции «Современные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их производства» (Москва, 2021);

— VII Международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (Москва, 2021);

— XIV Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Физико-механические испытания, прочность и надёжность современных конструкционных и функциональных материалов» (Москва, 2022);

— XVII Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Физико-механические испытания, прочность, надёжность современных конструкционных и функциональных материалов» (Москва, 2025).

Степень достоверности

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением комплекса взаимодополняющих экспериментальных и расчётных методов. В работе использованы механические испытания при статическом и циклическом нагружении, испытания на длительную прочность и циклическую трещиностойкость, профилометрия, оптическая

микроскопия и растровая электронная микроскопия. Такой подход позволил сопоставить расчётные данные не только с экспериментальной долговечностью, но и с фрактографическими признаками усталостного разрушения.

Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в развитии представлений о стадийности усталостного разрушения жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом селективного лазерного сплавления. Показано, что усталостная долговечность образцов с технологической шероховатостью определяется не только номинальным уровнем нагружения, но и локальной микрогеометрией поверхности, распределением концентраторов напряжений, состоянием приповерхностного слоя и формой фронта развивающейся трещины.

Разработанная расчётная схема объединяет энергетический подход к описанию стадии зарождения трещины и аппарат механики разрушения для стадии её устойчивого роста. Это позволяет физически обоснованно разделить общий ресурс образца на две составляющие: долговечность до формирования устойчивой трещины и остаточную долговечность, связанную с её распространением.

Полученные результаты расширяют область применения моделей упругопластического циклического деформирования с комбинированным упрочнением для материалов, полученных аддитивными технологиями, и позволяют учитывать влияние реального состояния поверхности при оценке усталостной долговечности.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертационная работа Рыжкова Петра Валерьевича соответствует паспорту научной специальности 2.6.17 – Материаловедение, область— технические науки.

Содержание диссертации соответствует следующим направлениям исследований паспорта специальности 2.6.17 – Материаловедение:

- п. 1 — в части установления закономерностей влияния состава, структуры, технологии получения и эксплуатационных факторов на физико-механические свойства материала, а также на надёжность и долговечность деталей и конструкций. В работе исследовано влияние режимов СЛС, угла наклона формируемых поверхностей, шероховатости и газовой пористости на механические характеристики и усталостную долговечность сплава ВЖ159;
- п. 5 — в части установления закономерностей и критериев оценки разрушения металлических материалов при действии механических нагрузок. В диссертации разработана двухстадийная схема оценки усталостного разрушения, включающая стадию зарождения трещины по энергетическому критерию P_{SWT} и стадию устойчивого роста трещины с использованием J-интеграла и кинетического уравнения Пэриса;

п. 6 — в части развития и применения методов исследования структуры, испытаний и определения физико-механических и эксплуатационных свойств металлических материалов. В работе использованы механические испытания при статическом и циклическом нагружении, испытания на циклическую трещиностойкость, профилометрия, оптическая микроскопия и фрактографический анализ;

п. 8 — в части разработки и компьютерной реализации математических моделей деформационных процессов при эксплуатации металлических материалов. В диссертации выполнено численное моделирование упругопластического циклического деформирования с применением модели комбинированного изотропно-кинематического упрочнения, а также моделирование распространения эллиптических усталостных трещин;

п. 13 — в части развития методов прогнозирования и оценки остаточного ресурса металлических материалов. В работе предложена и проверена расчётная методика прогнозирования усталостной долговечности образцов из сплава ВЖ159 с концентраторами напряжений и технологической шероховатостью поверхности;

п. 16 — в части исследования металлических материалов, предназначенных для эксплуатации в условиях повышенных температур и механических нагрузок. Исследуемый жаропрочный никелевый сплав ВЖ159 предназначен для применения в условиях высокотемпературного и циклического нагружения, характерных для ответственных элементов авиационной техники.

Личный вклад автора

Соискатель принимал участие в постановке задач и экспериментов, самостоятельно выполнял анализ полученных результатов. Эксперименты, численное моделирование и испытания выполнены им лично либо с его непосредственным участием.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ в рецензируемых журналах, из которых 5 включены в перечень ВАК при Минобрнауки России и 4 включены в международные базы данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и списка источников. Общий объём работы составляет 144 страниц, в том числе 119 страниц основного текста, включая 109 рисунков и 24 таблицы. Список использованных источников содержит 99 наименований и изложен на 11 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен аналитический обзор современных исследований, посвящённых механическим свойствам жаропрочных никелевых сплавов,

синтезированных методом СЛС. Рассмотрены основные направления развития аддитивных технологий, особенности формирования структуры при послойном лазерном плавлении и характерные дефекты, в том числе газовая пористость и технологическая шероховатость поверхности.

Приведены сведения о влиянии параметров сплавления и траектории сканирования на формирование микроструктуры. Особое внимание уделено вопросам циклической прочности и механики разрушения. Выделены ключевые факторы, определяющие чувствительность материала к концентраторам напряжений, включая углы наклона элементов формы и состояние поверхностного слоя.

На основании анализа литературы выявлена необходимость разработки методик расчёта усталостной долговечности с учётом анизотропии микроструктуры и дефектности поверхностной зоны. Обоснована необходимость разработки модели, сочетающей подходы упругопластического деформирования с энергетическими критериями разрушения.

Во второй главе рассмотрены материалы и методы исследования. Объектом выбран жаропрочный никелевый сплав ВЖ159, полученный методом СЛС из газоатомизированного порошка. Изготовлены плоские, цилиндрические и веерные образцы с различной ориентацией поверхностей, что позволило оценить влияние геометрии, шероховатости и пористости на качество сплавления и усталостную долговечность. После построения образцы подвергались вакуумной термообработке с двухступенчатым старением. Структура, поверхность и зоны разрушения исследовались методами оптической, растровой электронной микроскопии и фрактографии. Механические испытания включали растяжение, длительную прочность и малоцикловую усталость. Для расчёта долговечности и определения параметров модели пластичности применялось конечно-элементное моделирование.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных и численных исследований усталостного разрушения образцов из сплава ВЖ159, полученных методом СЛС. Выполнена адаптация сплава к технологии СЛС, показано влияние стратегии сканирования «stripes» с поворотом на 67° и последующей термообработки на формирование структуры, текстуры и γ' -фазы. На рисунке 1 показано изменение качества поверхностного слоя образцов в зависимости от угла наклона поверхности.

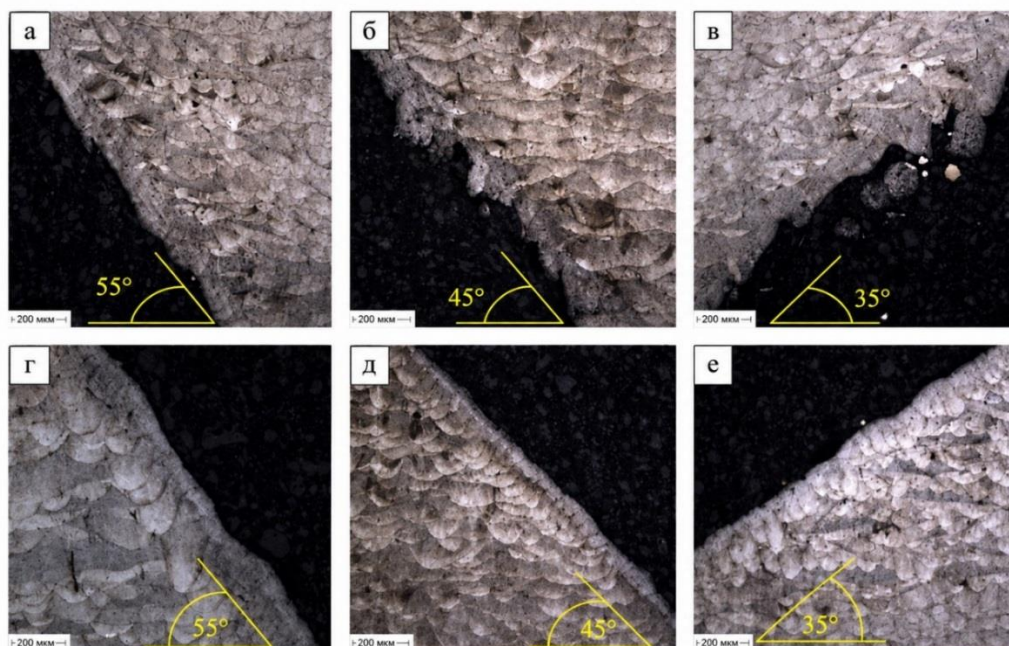


Рисунок 1 – Микроструктура приповерхностной области нижних (а–в) и верхних (г–е) поверхностей при углах наклона относительно платформы построения: 55° (а, г), 45° (б, д) и 35° (в, е).

Установлено, что при углах менее 55° наблюдается ухудшение качества сплавления, связанное с подплавлением порошка, формированием дефектного приповерхностного слоя, цепочек мелких равноосных зёрен и газовой пористости. Указанные особенности являются потенциальными концентраторами напряжений и могут снижать циклическую прочность материала. Полученные данные использованы для проверки адекватности двухстадийной модели прогнозирования долговечности с учётом шероховатости и геометрии.

На рисунке 2 показано распределение линейного размера зерна в приповерхностном слое и основном объёме материала.

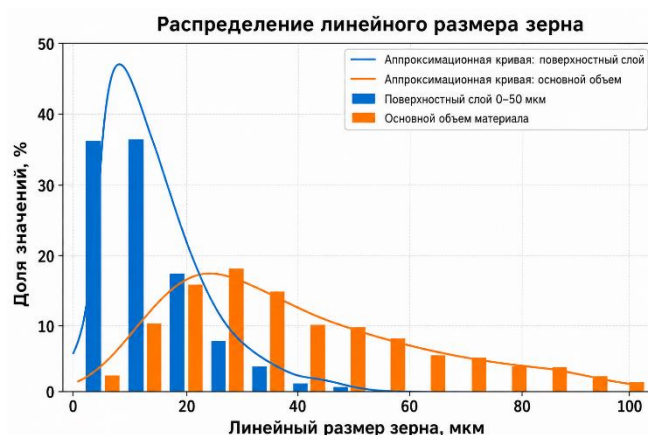


Рисунок 2 – Гистограммы распределения линейного размера зерна в приповерхностном слое 0–50 мкм и в основном объёме материала синтезированного образца после СЛС и полной термической обработки

Установлено, что в слое 0–50 мкм формируется более мелкозернистая структура: средний размер зерна составляет 13,3 мкм, медиана — 11,1 мкм, тогда как в основном объеме эти значения равны 40,1 и 34,3 мкм соответственно. Формирование мелкозернистого приповерхностного слоя связано с особенностями кристаллизации контурных треков при СЛС и может влиять на зарождение и развитие усталостных повреждений.

Для описания циклического деформирования сплава ВЖ159 построена упругопластическая модель с комбинированным изотропно-кинематическим упрочнением. Полная деформация представлялась в виде суммы упругой и пластической составляющих:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (1)$$

где ε — тензор полных деформаций; ε^e — тензор упругих деформаций; ε^p — тензор пластических деформаций.

Связь между напряжениями и упругими деформациями задавалась законом Гука:

$$\sigma = D^e : \varepsilon^e \quad (2)$$

где σ — тензор напряжений; D^e — тензор упругих констант.

Условие текучести записывалось в форме Мизеса:

$$f(\sigma, \alpha, \bar{\varepsilon}^p) = \sigma_{eq} - \sigma_y(\bar{\varepsilon}^p) = 0 \quad (3)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} (s - \alpha) : (s - \alpha)} \quad (4)$$

где σ_{eq} — эквивалентное напряжение по Мизесу; s — девиатор тензора напряжений; α — тензор обратных напряжений; $\bar{\varepsilon}^p$ — накопленная пластическая деформация; σ_y — текущее напряжение текучести.

Изотропное упрочнение задавалось зависимостями:

$$\sigma_y(\bar{\varepsilon}^p) = \sigma_{y0} + r(\bar{\varepsilon}^p) \quad (5)$$

$$r(\bar{\varepsilon}^p) = \sigma_{sat} [1 - \exp(-\beta \bar{\varepsilon}^p)] \quad (6)$$

где σ_{y0} — начальное напряжение пластического течения; σ_{sat} — предельное значение изотропного упрочнения; β — параметр скорости насыщения.

Кинематическое упрочнение задавалось уравнением изменения тензора обратных напряжений:

$$d\alpha = C_k d\varepsilon^p - \gamma_k \alpha d\bar{\varepsilon}^p \quad (7)$$

где C_k и γ_k — параметры кинематического упрочнения.

Параметры модели определены по экспериментальным кривым циклического нагружения методом нелинейной оптимизации Левенберга–Марквардта. Полученные значения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры модели циклического деформирования сплава ВЖ159

Амплитуда деформации	Параметры оптимизации			
	σ_{sat} , МПа	β	C_k , МПа	γ_k
0,6	40,13	8,214	35160	70,321
0,5	25,11	4,533	28561	42,131
0,4	19,51	4,376	31661	97,288
0,3	20,11	54,811	57261	197,201

На рисунке 3 показано соответствие расчётных и экспериментальных петель гистерезиса, подтверждающее корректность подобранных параметров упругопластической модели.

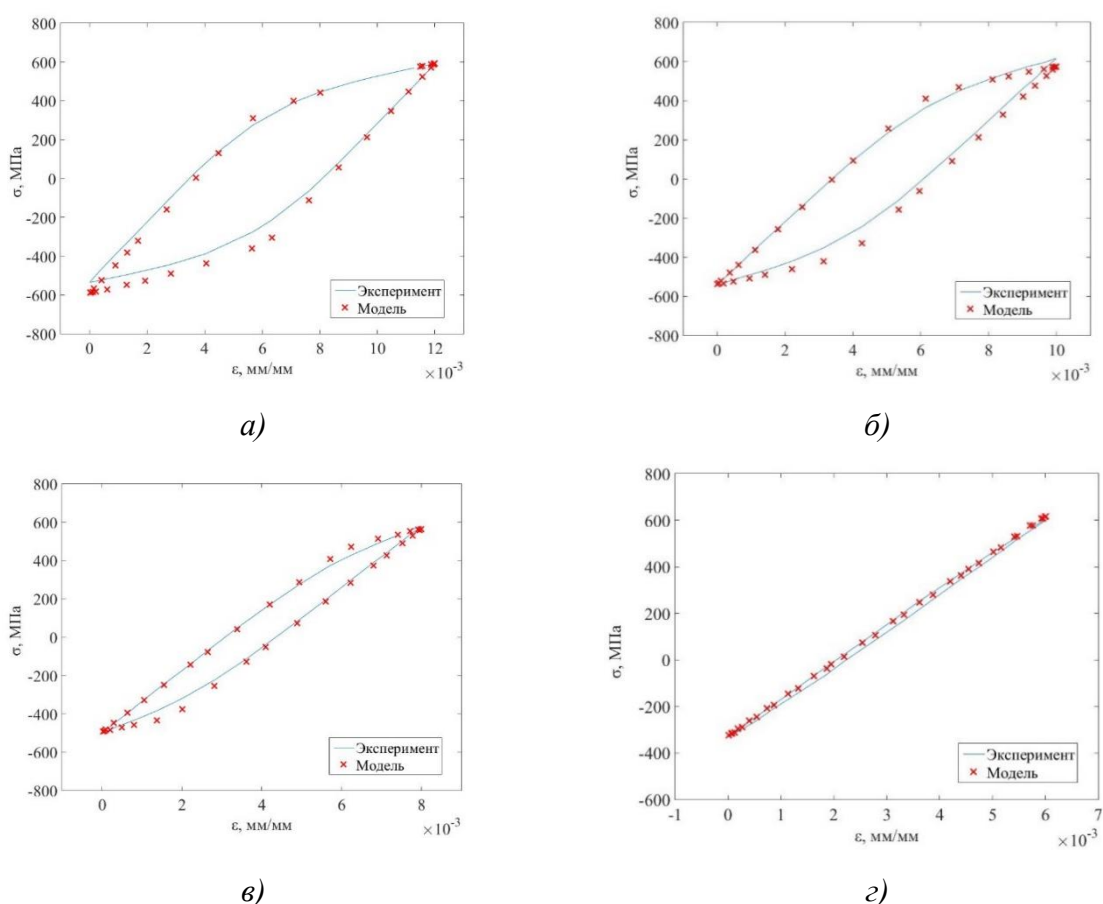


Рисунок 3 – Сравнение экспериментальных результатов с результатами численного моделирования упругопластического деформирования сплава ВЖ159 при размахе деформации 1,2 % (а), 1,0 % (б), 0,8 % (в) и 0,6 % (г)

В таблицах 2 и 3 приведены расчётные значения начальной и конечной длины трещин, а также рассчитанная долговечность для образцов с различной геометрией (гладкий, С-, U- и V-образные надрезы).

Таблица 2

Результаты расчета второй стадии распространения.

Тип образца	$\Delta\varepsilon/2$ [%]	Начальная длина трещины /КИН	Конечная длина трещины/КИН	Долговечность, N_{fcg}
гладкий	0,3	1 мм /15,4 МПа·м ^{1/2}	2,4 мм / 57 МПа·м ^{1/2}	17 790
С-типа	0,2	0,5 мм /15,1 МПа·м ^{1/2}	1,5 мм / 76 МПа·м ^{1/2}	17 365
U-типа	0,1	0,6 мм / 15 МПа·м ^{1/2}	1,85 мм / 86 МПа·м ^{1/2}	15 641
V-типа	0,1	0,8 мм / 15 МПа·м ^{1/2}	1,1 мм / 79,4 МПа·м ^{1/2}	8 781

Таблица 3

Результаты расчета долговечности с использованием параметра P_{SWT} и второй стадии распространения.

Тип образца	Долговечность по параметру P_{SWT} , N_{swt}	Долговечность второй стадии, N_{fcgr}	$N_{swt} + N_{fcg}$	Экспериментальная долговечность, N_{exp}	Ошибка, %
гладкий	4437	17 790	22 227	18 420	17 %
С-типа	18 495	17 365	35 860	29 530	21%
U-типа	2 148	15 641	17 789	23 310	24%
V-типа	720	8 781	9 501	11 260	16%

Для оценки стадии распространения трещины значения J -интеграла определялись численно в конечно-элементной модели и пересчитывались в эквивалентный коэффициент интенсивности напряжений:

$$K = \sqrt{\frac{JE}{1 - \nu^2}}, \quad (8)$$

где J — J -интеграл; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона.

Для смешанного нагружения использовалось выражение:

$$J = \frac{1 - \nu^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1 + \nu}{E} K_{III}^2, \quad (9)$$

где K_I , K_{II} , K_{III} — коэффициенты интенсивности напряжений для I, II и III мод деформирования.

Полученные значения ΔK использовались при численном интегрировании уравнения Пэриса:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n. \quad (10)$$

Распределение J -интеграла и расчётных значений КИН по фронту трещины для образцов с эллиптическими трещинами представлено на рисунке 4.

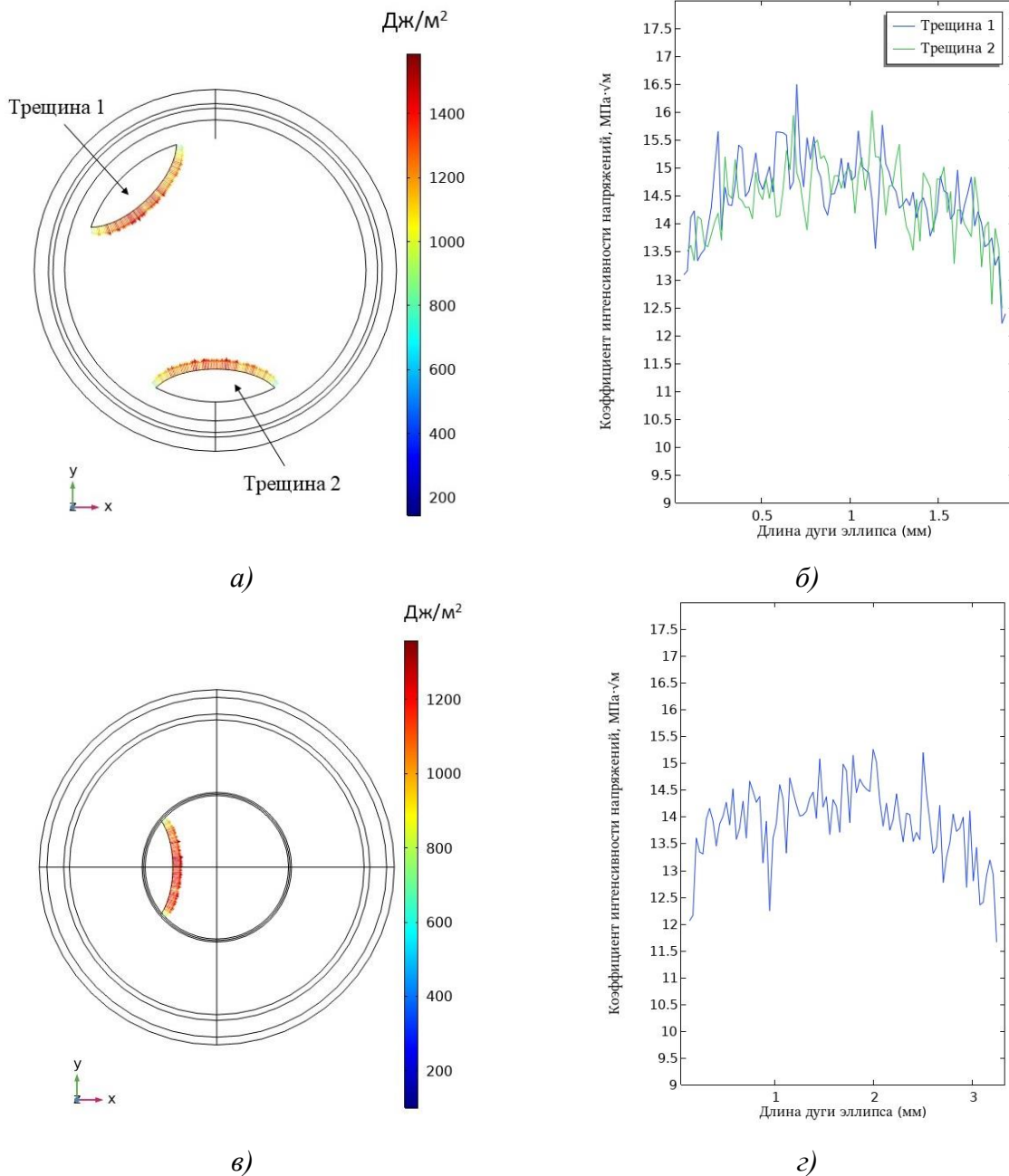


Рисунок 4 – Распределение J-интеграла и расчёт КИН по дуге эллипса: а, б – образец с концентратором напряжений при длине трещины 0,5 мм; в, г – гладкий образец при длине трещины 1 мм

Фрактографический анализ зон разрушения подтвердил двухстадийный характер усталостного разрушения: выделены области зарождения микротрещин на гладкой поверхности и стадия устойчивого роста трещины по основному объёму материала. Выявленные фрактографические признаки (форма фасеток скола, ширина микрорасслоений и ямочный рельеф долома) согласуются с двухстадийной моделью прогнозирования долговечности (рисунок 5).

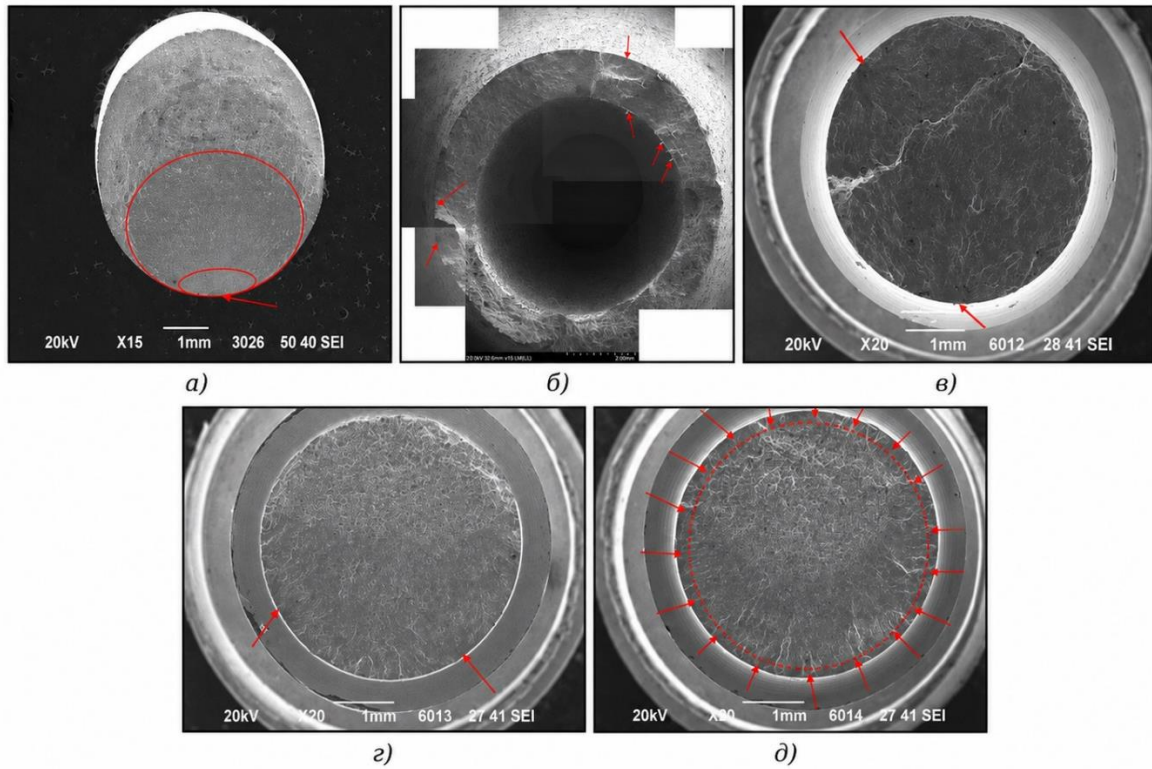


Рисунок 5 – Общий вид поверхности разрушения образцов: а – без концентратора напряжений; б – тонкостенный образец с технологической шероховатостью; в – с надрезом С-типа; г – с надрезом V-типа; д – с надрезом U-типа

Приведённые фрактографические данные подтверждают двухстадийный характер усталостного разрушения и согласуются с результатами численного моделирования кинетики роста трещин. Во всех типах образцов на фрактограммах выявлен общий признак — фасетки скола, отражающие универсальность квазихрупкого механизма разрушения независимо от условий нагружения и геометрии образца (рисунок 6).

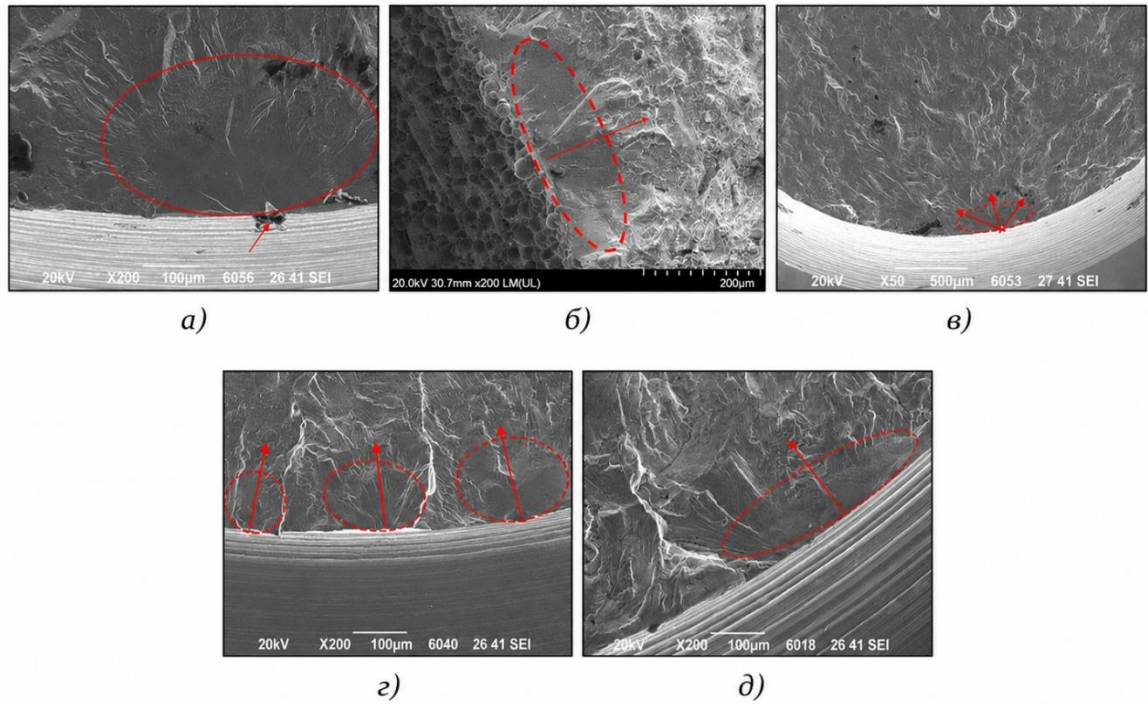


Рисунок 6 – Очаг разрушения образцов: а – без концентратора напряжений; б – тонкостенный образец с технологической шероховатостью; в – с надрезом С-типа; г – с надрезом V-типа; д – с надрезом U-типа

Для конструктивно-подобных образцов с технологической шероховатостью выявлено зарождение трещин вблизи поверхностных дефектов. Мелкие усталостные бороздки у очага разрушения свидетельствуют о последующем устойчивом росте трещины (рисунок 7), подтверждая двухстадийный характер разрушения.

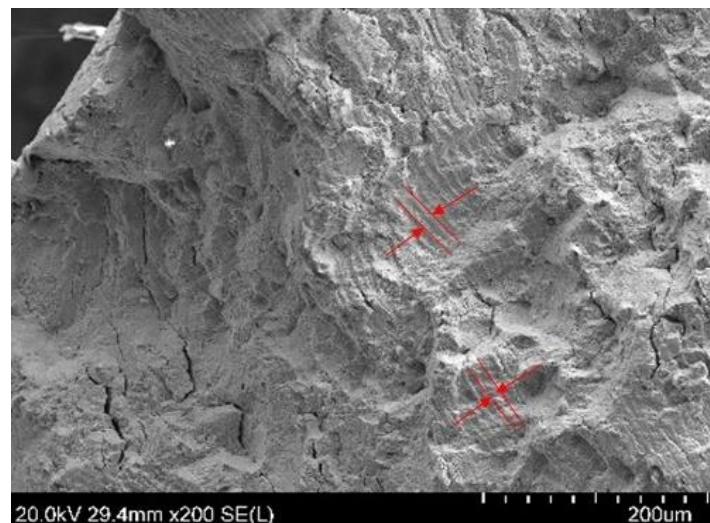


Рисунок 7 – Мелкие усталостные бороздки вблизи очага разрушения тонкостенного образца с технологической шероховатостью поверхности

Распределение расчётной долговечности анализировалось с учётом профилей шероховатости. На рисунке 8 показаны зоны локализации микротрещин при амплитуде

деформации $\Delta\varepsilon/2 = 0,5\%$. Установлено, что критические области инициирования трещин располагаются на расстоянии около 0,05 мм от поверхности. Это соответствует зоне, где при заданном уровне напряжений КИН может достигать порогового значения ΔK_{th} , определяющего возможность дальнейшего распространения трещины.

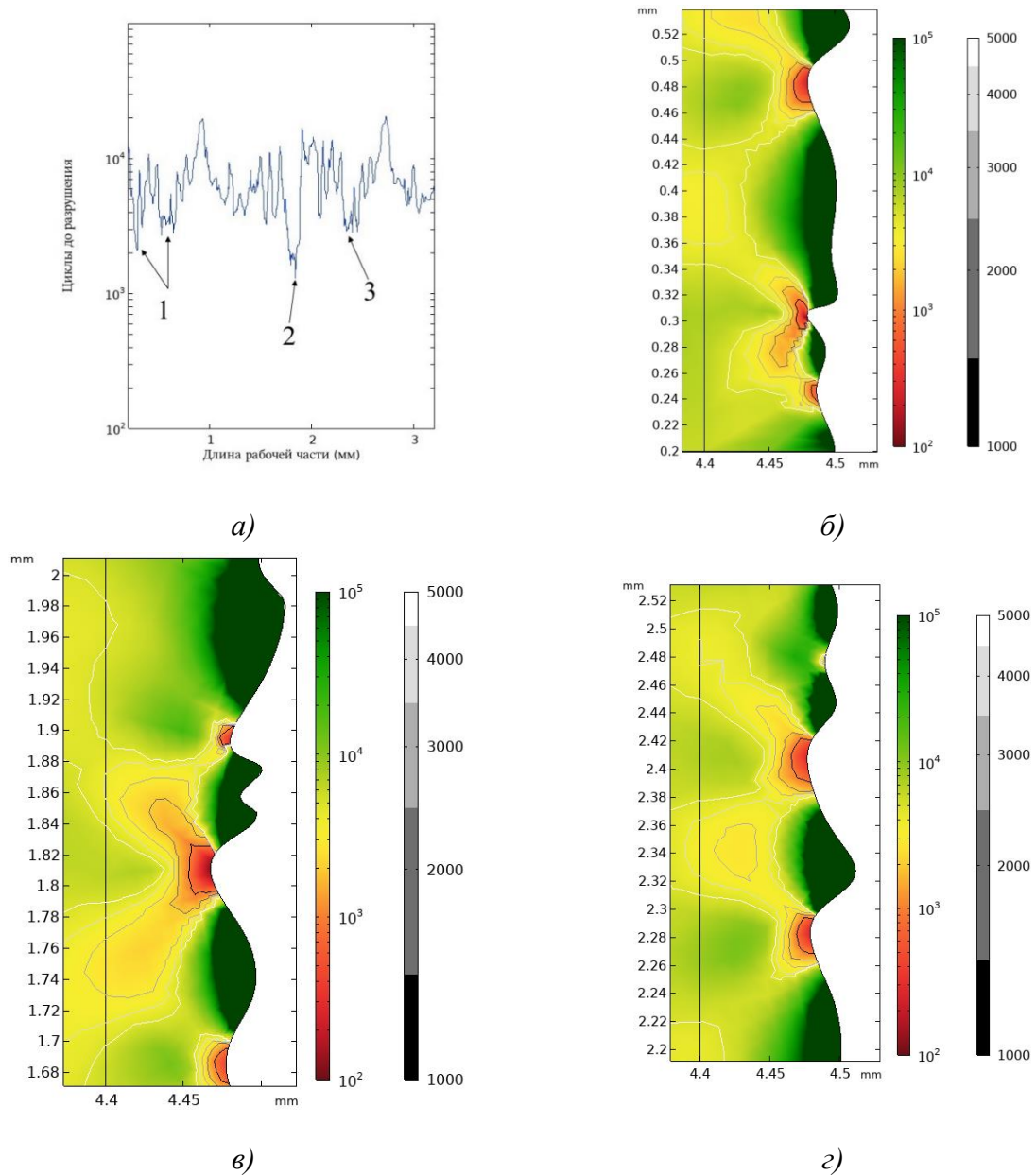


Рисунок 8 – Расчётная долговечность для представительного профиля шероховатости № 3 на расстоянии $L = 0,05$ мм от поверхности при $\Delta\varepsilon/2 = 0,5\%$: а – профиль и локальные значения долговечности; б–г – распределение усталостной долговечности в трёх выделенных областях

В таблицах 4 и 5 обобщены расчёты для трещин с различным отношением полуосей эллиптического дефекта.

Таблица 4

Результаты расчета второй стадии распространения.

Отношение полуосей эллиптической трещины, a/b	$\Delta\epsilon/2$ [%]	Начальная длина трещины /КИН	Конечная длина трещины/КИН	Долговечность, N_{fcg}
1	0,25	0,23 мм / 15 МПа·м ^{1/2}	1 мм / 41,79 МПа·м ^{1/2}	8 680
2		0,17 мм / 15 МПа·м ^{1/2}	1 мм / 45 МПа·м ^{1/2}	7 439
3		0,15 мм / 15 МПа·м ^{1/2}	1 мм / 49,56 МПа·м ^{1/2}	5 762
4		0,13 мм / 15 МПа·м ^{1/2}	1 мм / 52,1 МПа·м ^{1/2}	5 947
1	0,2	0,47 мм / 15 МПа·м ^{1/2}	1 мм / 25,1 МПа·м ^{1/2}	15 752
2		0,38 мм / 15 МПа·м ^{1/2}	1 мм / 28,6 МПа·м ^{1/2}	14 122
3		0,34 мм / 15 МПа·м ^{1/2}	1 мм / 31,77 МПа·м ^{1/2}	13 206
4		0,35 мм / 15 МПа·м ^{1/2}	1 мм / 32,79 МПа·м ^{1/2}	11 942

Таблица 5

Результаты расчета долговечности с использованием параметра P_{SWT} и второй стадии распространения

Отношение полуосей эллиптической трещины	Долговечность по параметру P_{SWT} , N_{swt}	Долговечно сть второй стадии, N_{fcg}	$N_{swt} + N_{fcg}$	Эксперименталь ная долговечность, N_{exp}	Ошибка, %
$\Delta\varepsilon/2 = 0,25 \%$					
1	2329	8 680	11 009	9 211	16 %
2		7 439	9 768		6 %
3		5 762	8 091		14 %
4		5 947	8 276		11 %
$\Delta\varepsilon/2 = 0,2 \%$					
1	5635	15 752	21 387	24 890	16 %
2		14 122	19 757		26 %
3		13 206	18 841		32 %
4		11 942	17 577		42 %

В работе выполнена оценка статистического распределения усталостной долговечности по профилям шероховатости представительной длины с использованием теории экстремальных значений. Пороговые значения долговечности при вероятности разрушения $P_f = 1$ % составили 2 329 и 5 635 циклов для амплитуд деформации $\Delta\epsilon/2 = 0,25$ % и 0,2 % соответственно.

На основании сопоставления результатов расчётов, экспериментальных данных и фрактографического анализа установлено, что в мелкозернистом приповерхностном слое наблюдается торможение коротких трещин на границах зёрен, что подтверждается микроструктурными изображениями (рисунок 9).

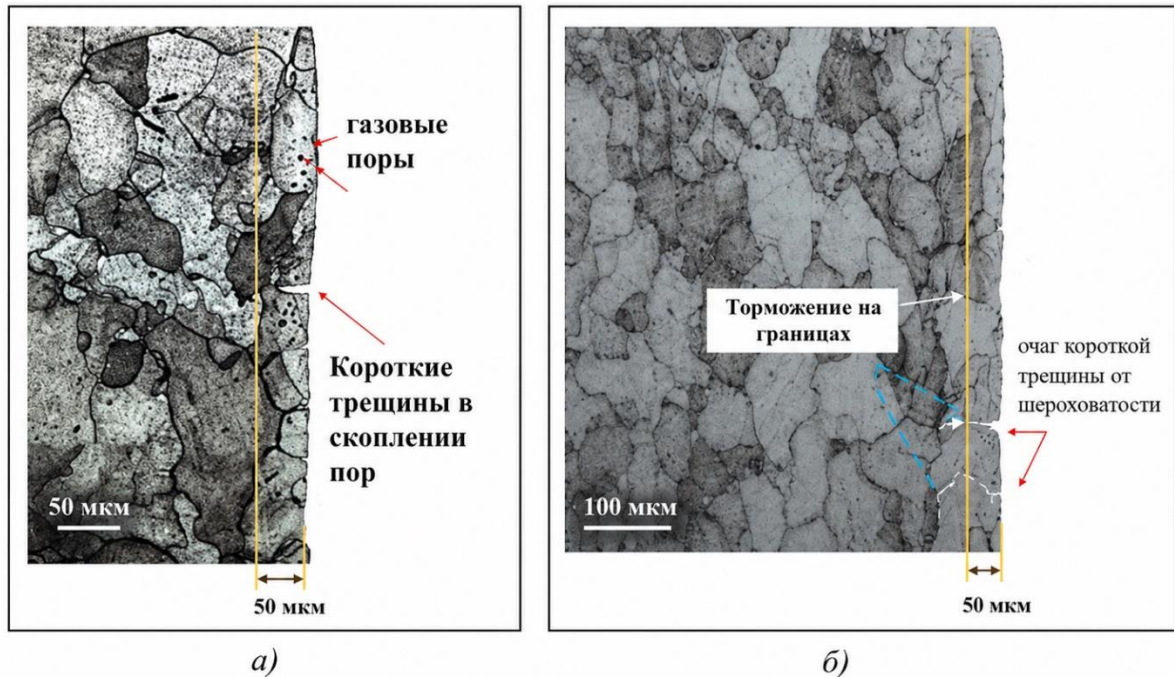


Рисунок 9 – Микроструктурные особенности приповерхностной зоны разрушенного образца: а – короткие трещины в области скопления газовой пористости; б – зарождение короткой трещины от технологической шероховатости и её торможение на границах зёрен.

Реализован численный подход к моделированию шероховатости образцов, полученных методом СЛС. Профили поверхности реконструировались по данным контактной профилометрии либо генерировались искусственно на основе суммы периодических тригонометрических функций со случайными фазовыми углами. Для каждого профиля рассчитывались локальные поля деформаций и зоны максимального накопления пластической энергии, рассматриваемые как потенциальные очаги зарождения усталостных трещин. Показано, что искусственные профили статистически воспроизводят поведение реальных поверхностей по уровню критических напряжений и расчётной долговечности.

При $\Delta\varepsilon/2 = 0,4\text{--}0,5\%$ расчётная долговечность имеет разброс, сопоставимый с экспериментом, а очаги зарождения трещин соответствуют локальным впадинам профиля. Это подтверждает эффективность двухстадийной модели для прогноза долговечности тонкостенных образцов с исходной шероховатостью (рисунок 10).

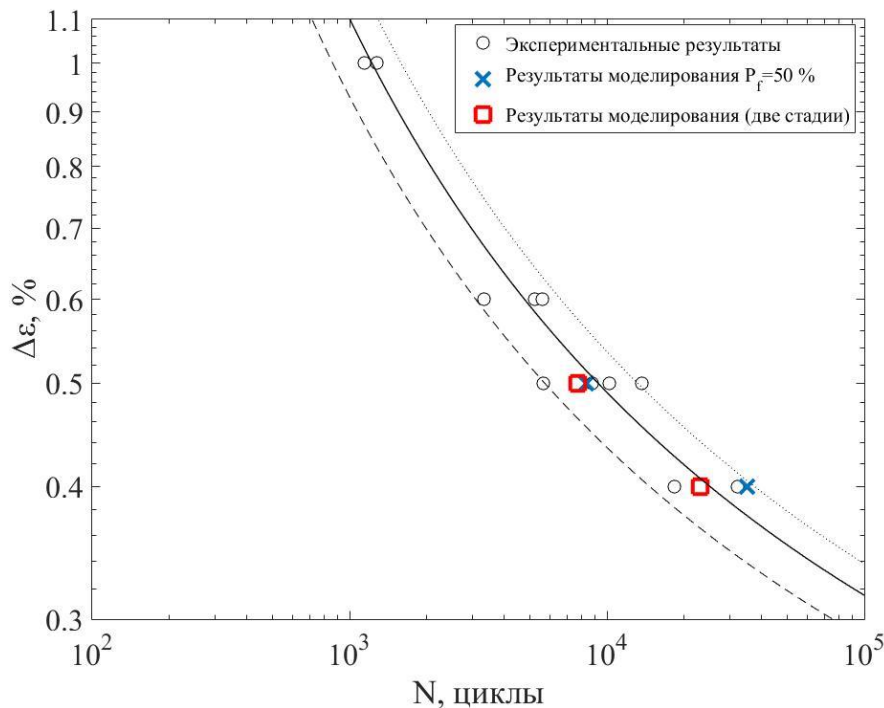


Рисунок 10 – Сходимость двухстадийной модели усталостного разрушения для тонкостенных образцов с технологической шероховатостью

Таким образом, моделирование случайных профилей шероховатости даёт возможность не только аппроксимировать реальное поверхностное состояние при отсутствии экспериментальных данных, но и количественно прогнозировать влияние локальной геометрии на усталостную долговечность с погрешностью не более 20 % относительно медианных экспериментальных кривых.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что диапазон углов наклона поверхности 35–55° при сплавлении является критическим с точки зрения качества её формирования, при этом угол около 55° соответствует пороговому условию перехода к стабильному формированию поверхностного слоя. При углах менее 55° наблюдается ухудшение качества нижних поверхностей, связанное с подплавлением порошка и формированием дефектного приповерхностного слоя. Показано, что применение высокоэнергетического контура позволяет получать поверхность с шероховатостью $Ra \approx 4\text{--}8$ мкм.

2. По результатам механических испытаний и фрактографического анализа установлено, что технологическая шероховатость и приповерхностная газовая пористость являются основными факторами снижения циклической долговечности сплава ВЖ159 при температурах до 650 °С. При этом повышенная исходная шероховатость не приводит к заметному снижению длительной прочности при 800–1000 °С. Подтверждён

двухстадийный механизм усталостного разрушения: зарождение и устойчивый рост трещины.

3. Получены параметры упругопластической модели циклического деформирования сплава ВЖ159 с комбинированным изотропным и кинематическим упрочнением. Их идентификация методом Левенберга–Марквардта обеспечила воспроизведение стабилизированных петель гистерезиса и корректное описание циклического поведения материала.

4. Реализована двухстадийная методика прогнозирования усталостной долговечности, включающая критерий P_{SWT} для стадии зарождения трещины и расчёт на основе J-интеграла и уравнения Пэриса для стадии её роста. Показано, что методика учитывает влияние геометрии образца, шероховатости и локальных концентраторов напряжений.

5. По результатам сопоставления расчётных и экспериментальных данных для гладких образцов и образцов с концентраторами С-, U- и V-типа подтверждена применимость предложенного подхода: расчётная долговечность согласуется с медианными экспериментальными значениями с погрешностью не более 24 %. Параметрический анализ формы эллиптического фронта трещины показывает чувствительность расчётной долговечности к отношению полуосей эллиптической трещины; для базового варианта $a/b = 1$ отклонение составляет 16 %.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список публикаций в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК

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.

Список публикаций в рецензируемых журналах 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.