

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук, доцента Гусева Дмитрия Евгеньевича
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

1. Актуальность темы диссертационной работы

Современное развитие высокотехнологичных отраслей промышленности сопровождается расширением применения аддитивных технологий при изготовлении ответственных деталей и конструкций. Селективное лазерное сплавление позволяет получать изделия из жаропрочных никелевых сплавов сложной пространственной формы, однако одновременно формирует специфический комплекс факторов, влияющих на работоспособность материала: технологическую шероховатость, локальную пористость, неоднородность приповерхностного слоя и остаточные напряжения. Для ответственных деталей, работающих при циклическом и высокотемпературном нагружении, эти особенности могут существенно влиять на механизмы и скорость зарождения усталостных трещин, что в свою очередь может привести к снижению долговечности.

В связи с этим установление закономерностей влияния состояния поверхности и дефектности материалов, полученных селективным лазерным сплавлением, на усталостную долговечность, а также разработка математических методов ее прогнозирования по результатам предварительных механических испытаний и параметрам циклического деформирования является актуальной научной и прикладной задачей. Выбранный автором в качестве объекта исследования жаропрочный никелевый сплав ВЖ159 представляет практический

интерес для деталей авиационной техники, работающих при повышенных температурах и циклических нагрузках.

Целью диссертационной работы являлось установление закономерностей влияния структурного состояния материала и параметров технологической шероховатости поверхностного слоя на усталостную долговечность сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления, и разработка методов ее прогнозирования. Поставленная цель соответствует содержанию выполненных исследований и последовательно раскрывается в экспериментальной и расчетной частях работы.

2. Общая характеристика, структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов по работе, перечня сокращений и обозначений, списка использованных источников. Общий объем работы составляет 143 страницы, содержит 109 рисунков и 24 таблицы, список использованных источников включает 99 наименований. По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ в рецензируемых изданиях, из которых 5 входят в перечень ВАК, а 4 индексируются международными базами Scopus и Web of Science.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, а также основные положения, выносимые на защиту. Представлены сведения об апробации работы, степени достоверности полученных результатов, о соответствии диссертации паспорту специальности, о личном вкладе автора, количестве публикаций по материалам диссертации, ее структуре и объеме.

Следует отметить внутреннюю согласованность поставленных задач: от анализа влияния параметров селективного лазерного сплавления на микроструктуру и технологическую шероховатость образцов из сплава ВЖ159 автор переходит к экспериментальному определению механических характеристик

и особенностей циклического поведения аддитивно полученного сплава ВЖ159, затем к разработке и идентификации параметров модели циклического деформирования и, наконец, к прогнозированию усталостной долговечности образцов с различной геометрией и состоянием поверхности.

В первой главе приведен аналитический обзор исследований по статическому и циклическому нагружению жаропрочных никелевых сплавов, полученных аддитивными методами. Рассмотрено влияние технологических дефектов селективного лазерного сплавления на конструкционную прочность аддитивно полученных материалов, обсуждены энергетические критерии усталостного разрушения, чувствительность материалов к концентрации напряжений и подходы механики разрушения к оценке предельно-допустимых размеров дефектов. Отдельное внимание уделено численному моделированию поврежденности и разрушения материалов с технологическими дефектами. Обзор литературы логично подводит к обоснованию необходимости при прогнозировании циклической долговечности совместно использовать расчеты локального энергетического критерия зарождения усталостной трещины с расчетами последующей стадии ее роста.

Во второй главе описаны объекты и методы исследования, геометрические характеристики используемых образцов и применяемое испытательное оборудование. Комплекс экспериментальных методов включает профилометрию, оптическую микроскопию и фрактографический анализ, статические и циклические механические испытания, включая испытания на циклическую трещиностойкость. Такой набор методов исследований является достаточным для решения поставленных задач и позволяет сопоставлять параметры поверхности, механическое поведение и фактические механизмы разрушения материала.

Третья глава является основной научно-исследовательской частью диссертационной работы. В ней рассмотрена адаптация технологии селективного лазерного сплавления к сплаву ВЖ159, исследованы закономерности

формирования неровностей и дефектов поверхности при различных задаваемых углах ее наклона, изучен комплекс механических характеристик аддитивно полученного сплава ВЖ159, описаны результаты измерения и моделирования шероховатости поверхности. Для описания упругопластического циклического деформирования сплава применена модель с комбинированным изотропно-кинематическим упрочнением, параметры которой идентифицированы методом Левенберга–Марквардта, а для описания процессов зарождения усталостной трещины и прогнозирования долговечности был применен энергетический критерий PSWT. На основании результатов фрактографического анализа автор связывает расчетные зоны максимальной повреждаемости с фактическими очагами разрушения. Для образцов с концентраторами напряжений и для гладких образцов выполнено моделирование распространения трещины с использованием J-интеграла и кинетического уравнения Пэриса. Таким образом, было показано, что общая долговечность материала является результатом двух стадий разрушения: формирования устойчивой усталостной трещины и ее последующего роста до предельного состояния.

Отдельно следует отметить стремление автора учесть в своей работе реальное состояние поверхности исследуемых образцов. Автором были рассмотрены экспериментальные профили поверхности как после механической обработки, так и при исходной технологической шероховатости. Была применена «оцифровка» полученных профилей по данным оптической микроскопии и проведено моделирование случайных профилей поверхности. Было установлено, что для тонкостенных образцов с исходной шероховатостью очаги зарождения трещин соответствуют локальным впадинам профиля, а расчетная долговечность сопоставима с экспериментальными результатами.

3. Научная новизна, обоснованность и достоверность результатов

К наиболее значимым результатам, определяющим научную новизну работы, следует отнести установление критических значений углов наклона

поверхности, оказывающих влияние на качество приповерхностного слоя, формирующегося методом селективного лазерного сплавления. Автором показано, что при углах наклона поверхности менее 55° наблюдается рост ее дефектности, обусловленной подплавлением порошка и нестабильными условиями формирования.

По результатам механических испытаний и фрактографического анализа установлено, что технологическая шероховатость и приповерхностная газовая пористость являются ключевыми факторами, определяющими снижение циклической долговечности сплава ВЖ159 при температурах испытаний ниже 650°C . При этом повышенная исходная шероховатость не приводит к сопоставимому снижению длительной прочности в диапазоне температур испытаний от 800 до 1000°C . Полученный результат важен для классификации механизмов разрушения, определяющих ресурс работоспособности деталей, подвергающихся длительному статическому и циклическому высокотемпературному нагружению.

Научный интерес представляет предложенная автором методика идентификации параметров упругопластической модели с комбинированным изотропно-кинематическим упрочнением при циклическом деформировании сплава ВЖ159. С помощью нелинейной оптимизации экспериментальных кривых по Левенбергу–Марквардту автор смог воспроизвести стабилизированные петли гистерезиса и сформировать методологическую основу для расчета напряженно-деформированного состояния в локальных зонах концентрации напряжений.

К наиболее важным научным результатам диссертации следует отнести предложенную двухстадийную методику прогнозирования усталостной долговечности, согласно которой на первой стадии разрушения, соответствующей зарождению трещины, в расчетах используется критерий PSWT, а на второй, соответствующей устойчивому росту трещины, — J-интеграл и кинетическое уравнение Пэриса. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных для

гладких образцов и образцов с концентраторами напряжений показало, что погрешность прогнозирования не превышает 24 %, что подтверждает работоспособность предложенного подхода.

Обоснованность и достоверность сделанных в работе выводов обеспечиваются использованием взаимодополняющих друг друга экспериментальных методов, сопоставлением результатов расчетов с результатами механических испытаний и фрактографического анализа, а также количественной идентификацией параметров моделей по экспериментальным данным. Существенным достоинством работы является то, что предложенная методика расчетов проверялась не только на гладких образцах, но и на образцах с локальными концентраторами и тонкостенных образцах с технологической шероховатостью.

4. Практическая значимость результатов

Практическая значимость работы заключается, прежде всего, в разработанных рекомендациях по проектированию и оценке ресурса деталей из сплава ВЖ159, получаемых методом селективного лазерного сплавления. Определен критический диапазон углов наклона поверхности, при котором необходимо учитывать ухудшение качества нижних поверхностей, а также установлен характерный уровень технологической шероховатости порядка $Ra \approx 4-8$ мкм для исследованных режимов формирования поверхности.

В работе предложена методика расчета усталостной долговечности образцов из сплава ВЖ19, позволяющая учитывать влияние геометрии образца, локальных концентраторов напряжений и технологической шероховатости. Такой подход представляет интерес для расчетного сопровождения аддитивно изготовленных деталей, поскольку напрямую связывает измеряемое состояние поверхности и механические свойства материала с прогнозируемым ресурсом.

Результаты работы могут быть использованы на предприятиях авиационной промышленности при выборе режимов изготовления, назначении требований к

состоянию поверхности и обосновании допустимости локальных дефектов в деталях авиационной техники из сплава ВЖ159. Полученные данные также представляют интерес для дальнейшего развития расчетно-экспериментальных методов оценки остаточного ресурса изделий и из других материалов, выполненных методами аддитивных технологий.

5. Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Содержание диссертационной работы соответствует научной специальности 2.6.17 – Материаловедение. Исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, непосредственно связаны с установлением закономерностей влияния технологии получения, структуры и эксплуатационных факторов на физико-механические свойства и долговечность металлических материалов; с разработкой критериев разрушения; с применением методов механических испытаний и фрактографии; с компьютерной реализацией моделей циклического деформирования и распространения трещин; а также с развитием методов прогнозирования усталостной долговечности и остаточного ресурса.

6. Замечания по диссертационной работе

1. При моделировании влияния технологической шероховатости на усталостную долговечность автор использует как реальные оцифрованные профили, так и случайно сгенерированные поверхности. Вместе с тем в работе недостаточно подробно обсуждается чувствительность расчетной долговечности к выбору конкретного представительного профиля при одинаковых значениях интегральных параметров шероховатости R_a и R_z . Поскольку локальный радиус впадины и шаг неровностей непосредственно влияют на концентрацию напряжений, было бы полезно отдельно показать, какие параметры геометрии профиля являются определяющими для предложенной методики расчета.

2. В математической модели, описывающей стадию устойчивого роста усталостной трещины, для гладких образцов начальная длина трещины была

принята равной 1 мм, основываясь на протяженности начального (устойчивого) участка кинетической диаграммы, а конечная длина, равная 2,4 мм, была определена по результатам фрактографических исследований. В этой связи требуются дополнительные пояснения: насколько итоговая расчетная долговечность чувствительна к выбору начального размера трещины и может ли этот параметр быть определен непосредственно по размерам наблюдаемой очаговой зоны усталостного разрушения.

3. Для расчета скорости роста трещины в работе были использованы константы уравнения Пэриса, определенные по результатам циклических испытаний компактного образца. Представляется целесообразным более подробно обсудить возможности использования этих параметров для моделирования долговечности образцов с полуэллиптической поверхностной трещиной, а также с другими концентраторами напряжений, поскольку напряженное состояние в вершине трещины, форма фронта и условия замыкания трещины в этих случаях должны быть другими.

4. В литературном обзоре справедливо отмечается влияние остаточных напряжений, формируемых при селективном лазерном сплавлении, на повреждаемость материала. Однако в предложенной автором методике расчета долговечности их вклад явно не выделен. Следовало бы пояснить, в какой степени примененная термическая обработка могла снизить остаточные напряжения и как их возможное сохранение может повлиять на точность прогноза долговечности.

5. В работе технологическая шероховатость и приповерхностная газовая пористость рассматриваются как основные факторы снижения циклической долговечности при температурах до 650 °С. При этом их индивидуальный вклад в снижение ресурса количественно разделен не полностью. Было бы полезно привести более развернутое обсуждение того, какой из этих факторов является доминирующим для различных диапазонов деформации, и как предложенная

модель может быть использована для учета влияния на циклическую долговечность поровых дефектов.

6. В тексте диссертации содержатся рисунки, на которых изображены диаграммы с подписями к осям, сделанными на английском языке и слишком мелким шрифтом, что затрудняет их чтение.

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

7. 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 задача установления закономерностей усталостного разрушения материала, полученного аддитивным методом, и разработана расчетно-экспериментальная методика прогнозирования его усталостной долговечности с учетом состояния поверхности и локальных концентраторов напряжений.

Работа обладает внутренним единством, полученные результаты имеют научную новизну и практическую значимость, а выводы основаны на достаточном объеме экспериментальных и расчетных данных. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации. Перечень выступлений на научных конференциях и публикаций автора по теме диссертационной работы свидетельствует о высоком личном вкладе автора в научное исследование.

По актуальности, научной новизне, степени обоснованности и достоверности результатов, практической значимости и уровню выполненных исследований диссертационная работа «Усталостная долговечность жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного

сплавления» 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.

Отзыв составлен на основании диссертации, автореферата и основных публикаций Рыжкова П.В.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, доцент,
профессор образовательного центра
Института № 11,
старший научный сотрудник
лаборатории «Материаловедение»
ФГАОУ ВО «Московский
авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)»


Гусев Дмитрий Евгеньевич

«20» 10 2026 г.

125993, г. Москва, Волоколамское
шоссе, д. 4
E-mail: mai@mai.ru

Подпись Гусева Дмитрия Евгеньевича
удостоверяю:

Директор дирекции института №11




Беспалов Александр Владимирович

Я, Гусев Дмитрий Евгеньевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.