

Отзыв официального оппонента

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 специальности 2.6.17 Материаловедение

Представленная работа состоит из введения, 3-х глав, выводов, перечня сокращений и обозначений, списка использованных источников (99 источников), изложена на 143 страницах.

Диссертационная работа посвящена установлению закономерности влияния структурного состояния материала и параметров технологической шероховатости поверхностного слоя на усталостную долговечность жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления (СЛС), а также разработке методов прогнозирования усталостной долговечности на основании расчетных моделей.

Актуальность работы не вызывает сомнений, в связи с тем, металлопорошковая композиция жаропрочного сплава ВЖ159 широко используется при изготовлении аддитивных деталей газотурбинных двигателей. Наибольшее распространение получили методы СЛС, ПЛВ. Внедрение аддитивных деталей в конструкцию в настоящий момент нарастает быстрыми темпами, причем максимальный прирост по количеству новых конструктивных исполнений отмечается в последние пять лет. В связи с этим задачи, связанные с циклической долговечностью и трещиностойкостью материала выходят на первое место, поскольку данные характеристики в основном отвечают за ресурс конструкций, работающих в условиях повышенных вибраций.

В работе определены режимы СЛС при которых формируется удовлетворительная технологическая шероховатость и прогнозируемая приповерхностная газовая пористость, обоснованы режимы построения деталей. Предложена расчётная схема оценки усталостной долговечности образцов из сплава ВЖ159 с использованием энергетического критерия P_{SWT} , J- интеграла и кинетического уравнения Пэриса. Схема позволяет учитывать влияние технологической шероховатости, локальных концентраторов напряжений и геометрии фронта трещины.

К научной новизне данной работы следует отнести разработку двух стадийной модели прогнозирования усталостной долговечности образцов, которая учитывает стадию зарождения микротрещин в зоне технологической шероховатости и стадию устойчивого роста трещины на основе J-интеграла и кинетического уравнения Пэриса. Реализован комплексный подход к проверке адекватности модели усталостного разрушения, основанный на сопоставлении расчётных данных с экспериментальной долговечностью и фрактографическими исследованиями при подтверждении основных фрактографических признаков развития разрушения.

Первая глава – «Литературный обзор» Автор рассматривает влияние пористости на характеристики механических свойств и усталостную прочность, приводит данные о влиянии формы, расположения и распределения дефектов на конструкционную прочность. Также приведены данные влияния шероховатости поверхности на усталостную долговечность. Рассмотрен энергетический критерий усталостного разрушения, форма надреза (дефекта) для использования механики разрушения в прогнозных моделях циклической долговечности материала в привязке к структуре (под структурным фактором автором рассматривается шероховатость поверхности и дефектность). Необходимо отметить, что автор шероховатость рассматривает как совокупность периодических надрезов и ее влияние на долговечность учитывается через их глубину. Автору необходимо уточнить какой объем или площадь поверхности твердого тела необходимо оценить, чтобы использовать соотношения 1.10 и 1.11. Как метод внедрен в практику испытательных лабораторий или он только опробован в данной работе при выполнении исследовательской части? На странице 35 упомянуты модели фазового поля и ограничение их применения. По мнению автора, каковы перспективы применения данных моделей для деталей аддитивного производства? И для каких гетерофазных материалов возможно применение таких моделей?

Автор ставит цель и задачи исследования. Одной из задач исследования автор называет исследование влияния структуры на долговечность при циклическом нагружении. Вероятно, под структурой автор понимает несколько расширенное понятие, отличное от типовой формулировки в материаловедении. Необходимо сформулировать понятие «структура» – применительно к данному исследованию.

Вторая глава – «Объекты и методы исследования». Объектом исследования является жаропрочный никелевый сплав ВЖ159 с объемной долей упрочняющей фазы 10-15%. Порошок сплава получали распылением расплава потоком аргона. Процесс СЛС проводили в среде азота. Образцы для испытаний на статическую и циклическую прочность выращивали вертикально. В работе использованы современные средства измерения. Однако, не указаны данные об оборудовании для измерения шероховатости в данном разделе, хотя методика измерений приводится.

Третья глава – «Научно-исследовательская часть».

В разделах 3.1 и 3.2 найдены оптимальные технологические режимы построения деталей с учетом формирования поверхности удовлетворительного качества. Автор приводит данные по размеру зерна в материале поверхностного слоя и основном теле детали и утверждает, что мелкозернистое строение будет способствовать замедлению роста трещины благодаря развитым границам. Однако автор не уточняет значение микропористости в поверхностном слое детали. Эти данные необходимо сообщить.

В разделе 3.3 автор приводит результаты механических испытаний образцов (плоских и цилиндрических) при комнатной и повышенной температуре. Определение свойств проводилось на полированных, виброгалтованных, и SLM-образцах с исходной шероховатостью. Пластичность у образцов с исходной шероховатостью при повышенных температурах (1000°C) оказалась на 35–40 % выше по сравнению с полированными, как автор объясняет данный факт? Также шероховатость поверхности не оказала влияния на длительную прочность. Как данный факт можно объяснить? При этом циклическая долговечность снизилась на 17% на базе 10^4 циклов. Построена кинетическая диаграмма роста трещины на образцах с различными концентраторами напряжений. Установлено, что U и V-концентраторы снижают усталостную долговечность при меньшем размахе деформации в 2-3 раза по сравнению с образцами с С-концентратором и гладкими образцами. Таким образом можно предполагать, что в образцах с U и V-концентраторами трещина зарождается много раньше, чем в образцах без. Следовательно, и шероховатость (ее профиль) аналогично будет снижать долговечность.

В разделе 3.4 моделируется шероховатость поверхности деталей аддитивного производства. Имеется ссылка на методику моделирования шероховатости с помощью оптического микроскопа, однако автор далее не развивает данное направление и не ясно для чего его использовать, необходимо обозначить практическое применение в следующих разделах.

В разделе 3.5 циклические испытания и определение модели пластичности на стр.59 автор указывает, что для настройки модели использовали петли упругопластического гистерезиса в диапазоне 1–80 %, однако судя по кинетической кривой, стадия (80%) имеет уже довольно развитую магистральную трещину. Вопрос автору, было ли выполнено моделирование на условно меньшей стадии повреждения, например - 60% (диапазон опробования расчетной модели от 0,6 до 1,2% амплитуды полной деформации). Разработанная модель упругопластического деформирования, учитывающая комбинацию изотропного и кинематического упрочнения, обеспечивает достаточную точность описания механического поведения никелевого сплава ВЖ159 при каких эксплуатационных температурах?

Кривая зависимости параметра P_{swt} от долговечности N позволяет с достаточной точностью прогнозировать долговечность сплава – это справедливо при малом значении пластической деформации. Как автор считает будет ли достоверна модель при больших значениях пластической деформации.

Результаты моделирования упругопластического поведения с использованием энергетического критерия малоциклового усталостного разрушения демонстрируют консервативную оценку долговечности, соответствующую нижней границе экспериментальных данных. Такое положение расчётных значений усталостной долговечности указывает на раннюю стадию накопления повреждений в материале. В связи с этим вопрос: может требуются отдельные подходы к стадии накопления повреждений и развития повреждений?

Как считает автор? И в модели долговечности все таки, какой предел должен быть на стадии развития повреждений? Какой критерий?

Раздел 3.6 Сравнение результатов прогнозирования усталостной долговечности по параметру P_{SWT} с экспериментальными результатами образцов с надрезом: С-типа, U-типа V-типа. Автору необходимо было бы прокомментировать полученные результаты и выразить свое мнение. Опробованная модель также демонстрирует консервативную оценку долговечности для образцов с надрезом.

Раздел 3.7 результаты фрактографических исследований. На стр. 84 указано соотношение полуосей эллипса очагов начала разрушения (фасетки скола). Данные обстоятельства использованы в разработанной численной модели разрушения на основании данных КИН и J-интеграла. Как зависит долговечность от первоначальной площади повреждения (фасетки скола), которое рассмотрено в разделе 3.8 вне зависимости от надреза? Для опробованной модели справедливо только положение, что шаг развития трещины не изменяется, т.е. рассматривается долговечность при условии устойчивого роста трещины? В случае перехода на окончательную стадию разрушения модель не применяют? Может ли быть использована модель для блочного нагружения (нестационарного нагружения)?

В разделе 3.9 необходимо дать дополнительный комментарий относительно выражения: фрактографический анализ образцов с исходной шероховатостью показал сходство механизмов разрушения с образцами, имеющими концентраторы напряжений. Какого типа концентраторами?

Раздел 3.10 таблица 3.16 пропущено слово долговечность в заголовке.

Как автор прокомментирует наилучшую достоверность оценки долговечности при $\Delta\epsilon/2=0.25\%$. Чем это можно объяснить?

Работа структурирована, однако в тексте присутствуют незначительные опечатки и требуются небольшие уточнения:

- стр. 35 данные для какого материала приведены?
- стр. 39 показать эскиз образца;
- таблица 3.3 приведены результаты статистической обработки, рекомендовано продемонстрировать исходные данные;
- стр. 74 Рисунок 3.24 подпись вертикальной оси?

Дополнительный вопрос автору на стр. 76 указано: Снижение максимальных напряжений в этом режиме связано с релаксацией напряжений, интенсивность которой определяется сочетанием изотропного и кинематического упрочнения материала. Пояснить: это вывод экспериментальный или расчетный (моделированный)?

В целом работа очень интересная и своевременная. Модели прошли успешную валидацию с экспериментом. Основные подходы работы рекомендуется использовать для прогнозирования долговечности других материалов аддитивного производства.

Достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается апробацией на практике основных научных положений,

содержащихся в диссертации, соответствием результатов экспериментов с имеющимися литературными данными, использованием аттестованных расчетных методик и применяемых программ.

Основные положения работы апробированы – доложены и обсуждены на научных всероссийских и международных конференциях, статьи опубликованы в изданиях ВАК, Scopus и Web of Science, отражающие основное содержание работы.

Автореферат отражает краткое содержание диссертации. Поставленная цель и задачи в работе диссертантом успешно решены. Замечаний к выводам, выполненным по итогам работы нет.

Содержание диссертации соответствует п.1, п.5, п.6, п.8, п.13 и п.16 паспорта специальности 2.6.17. Материаловедение. По объему проведенных исследований, их актуальности, научной новизне и практической значимости диссертационная работа Рыжкова П.В. полностью соответствует п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842.

Работа выполнена на высоком научном уровне, а автор работы Рыжкова П.В. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.17. Материаловедение.

Начальник испытательной лаборатории
по исследованию деталей и узлов
АО «ОДК-Климов», к.т.н.

Тихомирова Елена Александровна
izcltihomirova@klimov.ru
+7911947-16-02

Подпись руки Тихомировой Е.А. заверяю
Начальник отдела кадров АО «ОДК-Климов»
Санкт-Петербург,
194100, ул. Кантемировская д.11
klimov@klimov.ru
izcltihomirova@klimov.ru



Е.А. Тихомирова
09.10.2026 г.

Виктор Викторович