

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Федотовой Дарьи Витальевны «Анализ смешанных форм циклического разрушения сталей, алюминиевого и титанового сплавов на основе МКЭ, количественной фрактографии и корреляции цифровых изображений», представленную по специальности 1.1.8. (01.02.04) – механика деформируемого твёрдого тела, на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

**Актуальность темы.** Практика эксплуатации изделий авиационной техники, энергетического машиностроения и трубопроводного транспорта показала, что несовпадение направлений действующих компонент напряжений и плоскостей расположения эксплуатационных дефектов различного масштаба и ориентации является скорее правилом, чем исключением. Подобные ситуации классифицируются в механике как смешанные формы деформирования и разрушения, и принадлежат к числу наиболее сложных проблем теоретического, вычислительного и экспериментального плана. Циклический характер приложения нагрузок в сочетании с нелинейным деформированием в зонах концентрации накладывают дополнительные условия в попытках достичь положительного результата при оценке несущей способности ответственных элементов конструкций. При этом современный уровень понимания и моделирования процессов накопления и развития повреждений требует объединения подходов макро- и мезоуровня по отношению к характерному размеру структурных элементов материала.

В этой связи представленная Д.В. Федотовой диссертационная работа является актуальной по выбору объектов анализа с целью обобщений результатов исследований трех типов металлических материалов для оценки их поведения при смешанных формах циклического упруго-пластического деформирования и разрушения. Для этого развит новый комплексный метод, объединяющий экспериментальные исследования, численное решение задач определения локального НДС, разработку моделей интерпретации скорости развития трещин, что сопровождается подробным фрактографическим анализом.

Полученные в рамках указанной постановки и реализации результаты диссертации определяют её **научную новизну, а также теоретическую и практическую значимость.**

**Обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций и достоверность полученных результатов.** Достоверность результатов исследования и обоснованность научных положений и выводов не вызывает сомнений, и обеспечена грамотной постановкой цели и задач; системным характером проведения исследований, применением современных вычислительных и экспериментальных методов исследований, а также согласием полученных данных с результатами смежных изысканий, изложенных в литературе.

**Структура и содержание работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 224 источников. Основной текст диссертации содержит 168 страниц; она проиллюстрирована 64 рисунками и 17 таблицами.

Во **введении** показана актуальность диссертационной работы, степень разработанности темы, цель и задачи, научная новизна, практическая ценность, связь работы с государственными программами и грантами, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность результатов, апробация работы; охарактеризован личный вклад автора.

В **первой главе** автором представлен обзор исследований по теме диссертации и показано, что несмотря на состав, многообразие и важность выполненных работ комплексный подход в анализе поведения металлов при смешанных формах циклического деформирования и разрушения не завершен в формулировках и обосновании.

Предметом проведенного литературного обзора уместно выступили методические вопросы формирования испытательного комплекса, включая непосредственные наблюдения средствами корреляции цифровых изображений и сканирующей электронной микроскопии, классические и современные теории пластичности, технологии и методы численных расчетов на основе МКЭ, критерии и параметры нелинейной механики трещин.

Подробный анализ литературных данных позволил автору сформулировать цель и задачи работы, которые адресованы разработке и обоснованию комплексного расчетно-экспериментального метода исследования механизмов и особенностей развития трещин при смешанных формах циклического разрушения с учетом свойств исследованных классов конструкционных металлических материалов.

**Вторая глава** диссертации имеет смысловую нагрузку формирования методической базы выполненного комплексного исследования. В табличной форме представлены основные виды испытаний (нормальный отрыв и начальный чистый сдвиг) на образце с односторонним боковым надрезом (CTS образец) и устройство его нагружения, которое позволило реализовать полный диапазон смешанных форм деформирования. Указан набор исследованных материалов – два типа стали, алюминиевый и титановый сплавы, широко применяемые в авиационных конструкциях и энергетическом машиностроении.

В данном разделе описан испытательный и измерительный комплекс, который включает электрогидравлический стенд, цифровую систему корреляции изображений, оптический инструментальный и сканирующий электронный микроскопы. Автором разработана методика измерений размеров трещины вдоль криволинейной траектории ее развития. Отдельного внимания заслуживает разработанная и реализованная методика измерения полей перемещений в вершине развивающейся трещины с применением техники корреляции цифровых изображений.

Завершают главу, представленные автором первичные экспериментальные данные в виде зависимостей длины трещины от накопленного количества циклов

нагружения для каждого из четырех исследованных конструкционных материалов отдельно при нагружении нормальным отрывом и начальным чистым сдвигом. Эта информация является основой для последующих численных расчетов, интерпретации данных испытаний, анализа и выводов по полученным результатам. Можно констатировать, что Д.В. Федотовой удалось сформировать комплексный метод исследования механизмов и особенностей развития трещин при смешанных формах деформирования основных классов конструкционных металлических материалов, что составляет методическую новизну диссертации.

Содержание **третьей главы** диссертации относится к основным численным результатам, полученных автором с использованием метода конечных элементов и данным прямых измерений полей деформаций в вершине трещины средствами корреляции цифровых изображений.

В начале главы автор приводит описание теоретических основ характеристики состояния материала в вершине трещины на основе выбранных и реализованных модельных представлений. Обращает на себя внимание широкий набор конституционных уравнений упругости, классической, градиентной и циклической теорий пластичности, который в подобной компоновке не рассматривался в литературе.

Далее автор приводит сформированные расчётные схемы МКЭ для дискретных точек криволинейных экспериментальных траекторий развития трещин, представленных в предыдущей главе, для всех назначенных в методической части работы условий циклического нагружения СТС образцов по типам нормального отрыва и смешанных форм деформирования. Для каждой такой модели МКЭ отдельно выполнены расчеты полей напряжений и деформаций с использованием теории упругости и трех теорий пластичности. При расчетах в рамках градиентной теории пластичности в состав входных данных введен дислокационный (Тэйлоровский) параметр масштаба структуры материала, ранее мало востребованный в практике численных расчетов.

Анализ выполненных численных расчетов напряженно-деформированного состояния экспериментальных образцов из исследованных материалов с криволинейными трещинами позволил автору оценить структуру полей напряжений в вершине трещины, ключевыми параметрами которой являются нелинейные коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) и показатели сингулярности. С использованием распределений напряжений в полярных координатах с привлечением введенной структуры полей представлены распределения упругих и упругопластических КИН и показателей сингулярности для экспериментальных траекторий развития трещин в образцах из всех исследованных материалов в условиях нормального отрыва, начального чистого сдвига и последующих смешанных формах разрушения.

Результаты сопоставительного анализа поведения этих параметров для рассмотренных конституционных уравнений упругости, классической, градиентной и циклической пластичности составили научную значимость и новизну

вычислительного аспекта в представленной диссертации. Среди них следует отметить, что развитие трещин начального чистого сдвига приводит к искривлению траектории и возникновению смешанных форм циклического деформирования по преимущественно псевдо-нормальному отрыву с малой асимметрией контуров зон пластичности. Также интересен вывод о том, что учет влияния параметра масштаба структуры материала в соответствии с градиентной теорией пластичности приводит к кратному увеличению локальных напряжений по сравнению с классической моделью Хатчинсона-Розенгрена-Райса. Автор считает, что подобные различия обусловлены инверсией изменяющихся вкладов составляющих общей плотности дислокаций по мере удаления от вершины трещины.

Прямые измерения полей перемещений в вершине трещины с использованием техники корреляции цифровых изображений позволили автору доказать, что существует диапазон относительных расстояний до вершины трещины, в котором они совпадают с численными результатами по МКЭ на основе классической, градиентной и циклической теориям пластичности. Границы подобных диапазонов зависят от форм циклического разрушения в сочетаниях нормального отрыва и поперечного сдвига.

Таким образом, результаты развернутых численных исследований послужили основой для последующей интерпретации и анализа экспериментальных данных по развитию трещин в исследованных металлических конструкционных материалах.

**Четвёртая глава** диссертации имеет обобщающий характер проведенного автором расчетно-экспериментального исследования характеристик циклической трещиностойкости сталей, алюминиевого и титанового сплавов.

Следуя канонам механики трещин, в начале главы автор приводит диаграммы усталостного разрушения в терминах упругих коэффициентов интенсивности напряжений, вводя при этом функцию эквивалентного КИН для смешанных форм циклического разрушения. Интересными являются обнаруженные автором эффекты поведения трещин после поворота траектории для ситуации начального чистого сдвига, которые зависят от упруго-пластических свойств рассмотренных конструкционных материалов.

Разный масштаб диаграмм усталостного разрушения в терминах упругих КИН и связанные с этим ограничения сравнительных оценок, побудили автора к интерпретации опытных данных в терминах пластических КИН. Это позволило установить различия в процессах усталостного разрушения в зависимости от использованных конституционных моделей нелинейного деформирования материала в области вершины трещины для смешанных форм деформирования. Следствием этого стал научный результат работы экспериментального плана, состоящий в обобщении и описании совместного влияния смешанных форм деформирования и упруго-пластических свойств сталей, титанового и алюминиевого сплавов на характеристики циклической трещиностойкости посредством новой формы нормализации диаграмм усталостного разрушения.

Органично вписался в структуру представленного комплексного исследования раздел диссертации по анализу морфологии и количественным характеристикам поверхностей разрушения испытанных образцов средствами электронной сканирующей микроскопии. Примечательным является установленный автором путем фрактографического анализа интересный новый факт формирования и развития усталостных бороздок для случая начального чистого сдвига и существование преимущественно псевдо-нормального разрушения именно в условиях смешанных форм циклического разрушения, который не был отмечен в известной литературе. Этот факт хорошо коррелирует с результатами выполненного автором численного анализа НДС в упруго-пластической постановке и данными прямых измерений цифровых изображений.

Анализ фрактографии поверхностей разрушения позволил автору определить зоны доминирующих механизмов разрушения и установить, что для всех исследованных конструкционных металлических материалов имеет место стадийность процессов циклического развития трещин и взаимосвязанная последовательность смены доминирующих механизмов разрушения. Получено, что шаг усталостных бороздок, измеренный по морфологии изломов образцов, при нагружении нормальным отрывом выше, чем при начальном чистом сдвиге и последующих формах смешанных форм циклического разрушения. Логическим завершением доказательной базы диссертации является раздел 4.5, относящийся к сформулированной научной новизне и подтверждающий достижение поставленной цели работы.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. На стр. 7 текста диссертации указано: «Введение в конституционные уравнения поведения среды параметра масштаба структуры материала в соответствии с градиентной теорией пластичности приводит к кратному увеличению локальных напряжений по сравнению с классической моделью Хатчинсона-Розенгрена-Райса». Далее, на стр. 87 величина масштабного параметра структуры материала принимается равной  $l = 5$  мкм. При этом не указано, из каких соображений сделано предположение именно о таком размере. Кроме того, исследованные материалы обладают достаточно разной структурой (что показано в работе), поэтому следовало бы пояснить, каким конкретно структурным элементом для каждого из материалов соответствовал этот размер?

2. На стр. 8 текста диссертации автор указывает: «Для всех исследованных конструкционных металлических материалов имеет место стадийность процессов циклического развития трещин и взаимосвязанная последовательность смены доминирующих механизмов разрушения». Данная формулировка является достаточно очевидной для усталости металлов в целом. Вероятно, имело смысл подробнее раскрыть упомянутые доминирующие механизмы разрушения, чтобы затем увязать их с характерным шагом усталостных бороздок.

3. На стр. 38 текста диссертации помимо «классических» деформационно-прочностных свойств было бы целесообразно привести справочные данные о

трещиностойкости (в том числе циклической) исследованных материалов. Это бы усилило обоснование выбора данных материалов в качестве объекта исследований. Кроме того, на стр. 39 текста диссертации в Таблице 2.1.2 приведена программа проведенных испытаний по определению скорости роста трещины в условиях смешанных форм деформирования. Рассмотрены два варианта нагружения: нормальный отрыв (Mode I) и начальный чистый сдвиг (Mode II). При этом, к сожалению, не приведено обоснование выбранного уровня приложенной нагрузки для каждого из типов исследованных материалов.

4. На стр. 78 текста диссертации на рис. 3.2.4 приведены «контуры напряжений в зоне пластических деформаций по траекториям роста трещин стали P2M и сплава ВТ6 при нормальном отрыве и начальном чистом сдвиге с последующими смешанными формами деформирования». Из рисунка не следует, какой размер имеют приведенные поля деформации? То же касается рис. 3.2.9 и 3.2.10 (стр. 88, 89), а также рис. 3.4.4 (стр. 115). Кроме того, на стр. 112 текста диссертации на рис. 3.4.1 приведены «экспериментальные VIC-3D зоны деформаций по траектории роста трещины CTS образца из стали P2M в условиях начального чистого сдвига: начальная трещина (а), момент поворота трещины (б) и состояние близкое к окончательному разрушению (в)». Возникает тот же вопрос, а как использованное увеличение оптической системы соотносилось с данными FEM? То же касается рис. 3.4.3 на стр. 113.

5. Ряд использованных автором формулировок следует считать не совсем удачными. Так на стр. 134 текста диссертации указано: «из представленных данных, в предлагаемом формате, установлено, что минимальным сопротивлением циклическому разрушению обладает сталь 34X, а максимальные свойства показывают алюминиевый 7050 или титановый Ti-6Al-4V сплавы, в зависимости от условий нагружения». К сожалению, использованная формулировка слишком расплывчатая. На стр. 142 текста диссертации указано: «из представленных на рисунке 4.4.8 данных, установлено, что в высокопрочных материалах, таких как сталь 34X и сплав титана Ti-6Al-4V ( $\sigma_u = 1260.4$  МПа и  $\sigma_u = 1289.6$  МПа, соответственно) шаг усталостных бороздок  $\delta$  существенно выше по сравнению с материалами средней прочности, т.е. сталь P2M и сплав алюминия 7050 ( $\sigma_u = 1190.0$  МПа и  $\sigma_u = 701.0$  МПа, соответственно)». К сожалению, автор далее никак не развивает сделанное заключение, ни с фундаментальной, ни с прикладной точки зрения. На стр. 145 текста диссертации автор констатирует факт «корреляции ветвления трещин начального чистого сдвига и фазовых полей разрушения». Не совсем понятно, что понимается под фазовыми полями разрушения и какое количественное выражение имела указанная корреляция?

6. Как справедливо заметила автор, работа действительно имеет справочный характер. Однако впечатление от ее прочтения несомненно бы усилилось, если среди защищаемых положений, заключений и выводов фигурировали не только качественные обобщения, но и количественная характеристика достижений проведенного исследования.

Указанные замечания носят скорее рекомендательный характер и не касаются сути защищаемых выводов и положений, а также не влияют на высокую оценку выполненного исследования.

**Оформление диссертации.** Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям (ГОСТ Р 7.0.11-2011). Материал диссертации изложен последовательно, логично и грамотным техническим языком. **Автореферат** диссертации соответствует её содержанию.

**Публикации по работе.** Результаты исследований полностью отражены в публикациях автора, среди которых 9 статей с ее определяющим вкладом в рецензируемых, преимущественно международных изданиях. Три статьи опубликованы в журналах первого квартиля, согласно базе научного цитирования WoS (а также Scopus).

**Соответствие паспорту специальности.** Оппонируемая диссертация полностью соответствует паспорту научной специальности 1.1.8. – механика деформируемого твердого тела.

**Заключение.** В целом работа Д.В. Федотовой производит впечатление прекрасно спланированной с продуманной логикой взаимосвязи экспериментальных и вычислительных инструментов, которые были успешно использованы для получения новых результатов теоретического, численного, испытательного, методического и прикладного плана. Сформулированные на этой основе положения, выносимые на защиту и выводы, обладающие несомненной научной новизной, свидетельствуют о достижении цели работы, убедительно аргументированы и доказаны соответствующими разделами текста диссертации.

Диссертация Д.В. Федотовой является решением задачи формирования критериальной и экспериментальной базы оценки предельного состояния материалов при сложном многофакторном воздействии, имеющей существенное значение для наукоемкого машиностроения при эксплуатации ответственных элементов конструкций на основе принципов допускаемой повреждаемости и оперативной диагностики технического состояния. К практическим приложениям результатов работы Д.В. Федотовой относится инженерный метод сопоставительной оценки характеристик циклической трещиностойкости на этапе выбора материалов для элементов конструкций, а также атлас фрактограмм поверхностей разрушения сталей, алюминиевого и титанового сплавов для анализа причин аварийных ситуаций в эксплуатации.

Диссертация Д.В. Федотовой является завершенной научно-квалификационной работой, выполнена на высоком научном уровне, содержит новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное практическое значение для развития страны. По совокупности использования современного уникального испытательного оборудования, цифровых методов прямых измерений развития трещин смешанных форм циклического разрушения, реализованных численных методов оценки напряженного состояния на основе современных теорий пластичности и

полученных обобщенных результатов, работа Д.В. Федотовой заслуживает высокой оценки и имеет хорошие перспективы продолжения в части комплексного мультифизического анализа, что является следующей масштабной научной задачей.

Диссертация «Анализ смешанных форм циклического разрушения сталей, алюминиевого и титанового сплавов на основе МКЭ, количественной фрактографии и корреляции цифровых изображений» отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» П. II.9, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Д.В. Федотова заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. – механика деформируемого твердого тела.

Заведующий лабораторией «Механики полимерных композиционных материалов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук», доктор технических наук, профессор

Сергей Викторович Панин

« 14 » марта 2024 г.

Подпись Панина С.В. заверяю  
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН, к.ф.м.н.



Наталья Юрьевна Матолыгина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
634055, г. Томск, пр-т Академический, д. 2/4  
Телефон: +7 (3822) 49-18-81  
Сайт: <http://www.ispms.ru>  
E-mail: [root@ispms.tomsk.ru](mailto:root@ispms.tomsk.ru)