

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 29.04.2024 № 128

О присуждении Федотовой Дарье Витальевне, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Анализ смешанных форм циклического разрушения сталей, алюминиевого и титанового сплавов на основе МКЭ, количественной фрактографии и корреляции цифровых изображений» по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела» принята к защите 22.02.2024, протокол № 125, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

Соискатель Федотова Дарья Витальевна 1995 г. рождения, в 2019 г. окончила ФГБОУ ВО "Казанский государственный энергетический университет" по специальности «Теплоэнергетика и теплотехника». В 2023 г. окончила аспирантуру очной формы обучения в ФГБУН "Федеральный исследовательский центр "Казанский научный центр Российской академии наук" (ФИЦ КазНЦ РАН) по научной специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела. В настоящее время работает младшим научным сотрудником лаборатории прочности Института энергетики и перспективных технологий ФГБУН ФИЦ КазНЦ РАН. Диссертация выполнена в ФГБУН ФИЦ КазНЦ РАН.

Научный руководитель – д.т.н., профессор, руководитель научного направления "Энергетика" Института энергетики и перспективных технологий ФГБУН ФИЦ КазНЦ РАН Шлянников Валерий Николаевич.

Официальные оппоненты:

1. Панин Сергей Викторович, доктор технических наук (01.02.04), профессор, заведующий лабораторией механики полимерных композиционных материалов ФГБУН "Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук" (г. Томск);
2. Селютина Нина Сергеевна, доктор физико-математических наук (1.1.8), старший научный сотрудник кафедры теории упругости ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет" (г. Санкт-Петербург);
дали положительные отзывы на диссертацию

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева" (Самарский университет), г. Самара, в

своим положительным заключением, составленным Л.В. Степановой, д.ф.-м.н., доцентом, заведующей кафедрой математического моделирования в механике; Ю.Н. Бахаревой, к.ф.-м.н., доцентом кафедры математического моделирования в механике, и утвержденном первым проректором-проректором по научно-исследовательской работе Самарского университета, д.т.н., доцентом А.Б. Прокофьевым, указала, что диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне. Диссертационная работа содержит новые вычислительные и экспериментальные результаты и положения, представляющие научный интерес и обладающие научной значимостью. Диссертация характеризуется полнотой и завершенностью, ясно и грамотно написана, хорошо проиллюстрирована графиками и рисунками. Представленные в диссертации результаты достоверны, выводы обоснованы. Применяемые в работе подходы могут быть использованы при изучении актуальных задач нелинейной механики разрушения. Представленная диссертационная работа «Анализ смешанных форм циклического разрушения сталей, алюминиевого и титанового сплавов на основе МКЭ, количественной фрактографии и корреляции цифровых изображений» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Федотова Дарья Витальевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Соискателем опубликовано 9 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. Zakharov A.P., Shlyannikov V.N., Tartygasheva A.M., **Fedotova D.V.** Couple effects of mixed mode biaxial loading and crack tip configuration on plastic stress intensity factor behavior at small and large scale yielding // Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 18. P. 749-756. (Scopus).

В работе представлены нелинейные параметры сопротивления разрушению (I_n -интеграл, J -интеграл, упруго-пластический КИН) как функции коэффициента двухосности нагружения и свойств основных конструкционных металлических материалов для трех типов конфигурации образца.

2. Shlyannikov V.N., **Fedotova D.V.** Crack growth and plastic, fracture process and damage zones behavior under mixed mode loading // Structural Integrity. 2020. Vol. 16. P. 117-123. (WoS, Scopus).

В работе проведены численные и экспериментальные исследования усталостных трещин в CTS образцах, изготовленных из основных конструкционных материалов. Установлено влияние вида нагружения и упруго-пластических свойств материалов на поведение зон процесса разрушения и пластичности в вершине трещины.

3. Shlyannikov V.N., **Fedotova D.V.** Distinctive features of crack growth rate for assumed pure mode II conditions // International Journal of Fatigue. 2021. Vol. 147. Art. id. № 106163. (WoS, Scopus Q1).

В работе представлены результаты комплексного расчетно-экспериментального исследования влияния смешанных форм деформирования на распространение усталостных трещин в конструкционных металлических материалах.

4. **Fedotova D.**, Khamidullin R., Shlyannikov V. Inversion of dislocation densities under mixed mode fracture // Engineering Failure Analysis. 2022. Vol. 138. Art. id. № 106311. (WoS, Scopus Q1).

В работе представлены распределения локальных упругих и упруго-пластических характеристик состояния материала по классической и градиентной теориям пластичности. Установлено влияние составляющих полной плотности дислокаций на упрочнение рассматриваемых металлических материалов.

5. **Fedotova D.**, Khamidullin R. Mixed mode crack paths in terms of plastic stress intensity factors based on conventional and strain gradient plasticity // Procedia Structural Integrity. 2022. Vol. 39. P. 419-431. (Scopus).

В работе приведены результаты интерпретации экспериментальных данных по скорости роста трещин в CTS образцах в терминах пластических коэффициентов интенсивности напряжений по классической и градиентной теориям пластичности. Установлено влияние масштабного параметра структуры материала.

6. Shlyannikov V., **Fedotova D.**, Khamidullin R. Couple analysis of DIC and FEM to quantify strain fields and crack-flank displacements in structural materials under cyclic mixed-mode I/II fracture // Procedia Structural Integrity. 2022. Vol. 42. P. 714-721. (Scopus).

Представлены результаты сравнительного анализа численных и экспериментальных данных, полученных на основе методов конечных элементов и корреляции цифровых изображений. Установлены области взаимного соответствия результатов численных расчетов и прямых измерений параметров НДС в вершине трещины.

7. Shlyannikov V., **Fedotova D.**, Khamidullin R. Mixed mode crack growth analysis using cyclic plasticity model // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2023. Art. id. № 104136. (WoS, Scopus Q1).

В работе представлен анализ и сравнение экспериментальных данных по скорости роста трещин смешанных форм деформирования в сталях, титановом и алюминиевом сплавах в терминах пластических коэффициентов интенсивности напряжений по классической и циклической теориям пластичности.

8. **Федотова Д.В.**, Хамидуллин Р.М. Развитие трещин в условиях начального чистого сдвига // Труды АкадемЭнерго. 2020. № 4. С. 49-56. (ВАК).

В работе представлены результаты испытаний CTS образцов из сталей, титанового и алюминиевого сплавов в полном диапазоне смешанных форм деформирования. Экспериментально получены зависимости изменения углов ориентации, девиации и поворота трещин вдоль их криволинейных траекторий.

9. Хамидуллин Р.М., **Федотова Д.В.** Анализ полей напряжений в вершине трещины и параметры сопротивления разрушению в условиях градиентной пластичности // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2021. – № 4. – С. 136-148. (ВАК, Scopus).

Представлены результаты расчетно-экспериментального исследования параметров сопротивления разрушению материалов в условиях плоской деформации и плоского напряженного состояния в полном диапазоне смешанных форм деформирования на основе уравнений градиентной пластичности.

Публикации содержат в сумме 102 страницы и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Панина С.В. В отзыве представлен анализ структуры и содержания диссертации, отмечены актуальность и степень разработанности темы исследований, научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость результатов, обоснованность научных положений, выводов и достоверность результатов исследований.

Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- отсутствует наглядная связь структуры каждого рассматриваемого металлического материала и используемых в численных расчетах значений масштабного параметра структуры материала l ;
- пожелание к изложению положений, выносимых на защиту;
- отсутствуют справочные данные о трещиностойкости исследованных материалов и не приводится обоснование выбранного уровня приложенной нагрузки;
- замечание к оформлению численных и экспериментальных результатов работы (поля параметров НДС в вершине трещины и экспериментальные VIC-3D зоны деформаций);
- наличие в тексте диссертации отдельных неудачных, неточных формулировок;
- в представленных положениях, выносимых на защиту, заключении и выводах присутствует только качественная оценка результатов работы, не хватает количественной характеристики достижений выполненных исследований.

2. Положительный отзыв официального оппонента Селютиной Н.С. В отзыве отмечено, что полученные результаты диссертационной работы являются новыми, перспективными и будут интересны для широкого круга специалистов, работающих в области механики деформируемого твердого тела. Оппонент отмечает следующие замечания:

- отсутствует сравнение полученных экспериментальных результатов с известными литературными данными;
- отсутствует обсуждение выбора экспериментальных CTS образцов для реализации смешанных форм разрушения;
- в первой главе вводятся переменные без пояснения их обозначения.

3. Положительный отзыв ведущей организации Самарский университет. В отзыве отмечается, что диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу и посвящена важным и актуальным вопросам современной механики разрушения. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и существенную практическую значимость – сопоставительный анализ поведения параметров сопротивления разрушению для конституционных уравнений упругости, классической, градиентной и циклической пластичности в сочетании с установленными экспериментально закономерностями развития трещин смешанных форм деформирования в материалах различных упругопластических свойств составили научную основу количественной оценки остаточной долговечности элементов конструкций с эксплуатационными дефектами сложной формы. Полученные данные о фрактографии поверхностей разрушения могут быть применены для получения экспертных оценок при обосновании конструктивно-технологических решений ремонта

и безопасной эксплуатации элементов конструкций. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- замечания по обзору научной литературы;
- в представленных уравнениях диссертационной работы допущен ряд опечаток;
- непонятно какие были использованы определяющие соотношения рассматриваемых теорий пластичности в вычислительном комплексе ANSYS;
- пожелание более подробного изложения краевой задачи циклической теории пластичности;
- замечание к описанию метода моделирования экспериментальных траекторий роста трещины;
- можно ли говорить о реализации полного диапазона смешанных форм нагружения;
- не хватает количественной оценки сопоставления полученных экспериментальных и численных результатов работы;
- отсутствует анализ чувствительности сетки конечных элементов к типу элементов;
- замечание к оформлению изображений контуров напряжений в зоне пластических деформаций, представленных на рис. 3.2.4;
- справедливы ли гипотезы сплошности при использовании указанных в работе значений минимального размера элемента и радиуса кривизны вершины трещины.

На автореферат поступило 9 отзывов:

1. Положительный отзыв от Каюмова Р.А., д.ф.-м.н., профессора, профессора кафедры механики ФГБОУ ВО "Казанский государственный архитектурно-строительный университет", г. Казань (без замечаний);
2. Положительный отзыв от Клевцова Г.В., д.т.н., профессора, профессора кафедры нанотехнологий, материаловедения и механики ФГБОУ ВО "Тольяттинский государственный университет", г. Тольятти (1 замечание);
3. Положительный отзыв от Кургузова В.Д., д.ф.-м.н., доцента, главного научного сотрудника лаборатории механики разрушения материалов и конструкций ФГБУН "Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН", г. Новосибирск (2 замечания);
4. Положительный отзыв от Манько А.В., к.т.н., доцента, доцента кафедры механики грунтов и геотехники Института гидротехнического и энергетического строительства ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет", г. Москва (без замечаний);
5. Положительный отзыв от Матвиенко Ю.Г., д.т.н., профессора, заведующего отделом прочности, живучести и безопасности машин ФГБУН "Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН", г. Москва (3 замечания);
6. Положительный отзыв от Москвичева Е.В., к.т.н., руководителя инженерно-испытательного центра Красноярского филиала ФГБУН "Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий", г. Красноярск (1 замечание);
7. Положительный отзыв от Перельмутера М.Н., д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника ФГБУН "Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН", г. Москва (5 замечаний);

8. Положительный отзыв от Султанова Л.У., д.ф.-м.н., доцента, заведующего кафедрой теоретической механики ФГАОУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный университет", г. Казань (4 замечания);
9. Положительный отзыв от Шанявского А.А., д.т.н., профессора, начальника отдела металлофизических исследований авиационных материалов ФАУ "Авиационный регистр Российской Федерации", г. Москва, а/п Шереметьево-1 (без замечаний).

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- при анализе экспериментальных данных не учитывается тип кристаллической решетки рассматриваемых металлических материалов;
- отсутствуют рекомендации об использовании полученных результатов работы в расчетах по тому или иному критерию механики разрушения;
- замечание к изложению положений, выносимых на защиту;
- замечания к оформлению представленных уравнений 1-4;
- непонятно как учитывалось изменение свойств материала при численных расчетах по нелинейной кинематической модели упрочнения Шабоса;
- отсутствует информация о способе нахождения K -тарировочных коэффициентов;
- вопрос о распространении экспериментальной траектории трещины при нагружении начальным чистым сдвигом;
- отсутствуют используемые в расчетах формулы коэффициентов интенсивности напряжений;
- отсутствует объяснение значительного повышения значений напряжений вблизи вершины трещины по градиентной теории пластичности;
- вопрос о способе моделирования трещины в расчетных схемах МКЭ;
- замечание к терминам "пластические коэффициенты интенсивности напряжений" и "нелинейные коэффициенты интенсивности напряжений";
- отсутствует информация о том, как были определены свойства исследуемых материалов; не указаны константы циклической трещиностойкости материалов;
- не приведено обоснование выбора рассматриваемых вариантов нагружения экспериментальных CTS образцов;
- отсутствует информация о характеристиках расчетных схем МКЭ.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области фундаментальных основ прочности, пластичности и разрушения, математических методов моделирования, численных расчетов, металлографических и фрактографических исследований механизмов и процессов разрушения, оценки несущей способности элементов конструкций; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация Самарский университет является одним из ведущих научных центров в области математического моделирования в механике деформируемого твердого тела, в нем активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования по широкому спектру проблем теоретической, прикладной, вычислительной и экспериментальной механики, инженерным приложениям в машиностроении, авиации и энергетике. Научные школы Университета поддерживаются грантами ведущих научных фондов Российской Федерации и контрактами с предприятиями. Университет является учредителем 6 научных изданий, среди которых: «Вестник Самарского государственного технического университета, серия «Физико-математические науки», «Технические науки», включенные в международные базы WoS и Scopus. Отзыв ведущей организации, содержащий подробную характеристику содержания диссертационной работы; положительную оценку актуальности темы исследований, научной новизны и достоверности полученных результатов, а также теоретической и практической значимости работы обсужден и одобрен на заседании кафедры математического моделирования в механике в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан комплексный расчетно-экспериментальный метод исследования механизмов и закономерностей развития трещин при смешанных формах циклического разрушения с учетом свойств конструкционных материалов различных классов на основе математического моделирования, количественного фрактографического анализа и корреляции цифровых изображений;

предложена новая форма представления диаграмм усталостного разрушения для обобщения и описания совместного влияния смешанных форм деформирования и упруго-пластических свойств сталей, титанового и алюминиевого сплавов на характеристики циклической трещиностойкости;

доказано и подтверждено фрактографическим анализом существование закономерностей на каждом из этапов развития трещин в сталях, титановом и алюминиевом сплавах при смешанных формах циклического разрушения;

разработан и проведен сравнительный анализ экспериментальных и численных данных для напряженно-деформированного состояния в области вершины усталостной трещины для конструкционных материалов различных классов, установлены области взаимного соответствия параметров, полученных на основе МКЭ, количественной фрактографии и методом корреляции цифровых изображений.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано преимущество использования новых нелинейных параметров сопротивления разрушению конструкционных материалов при смешанных формах разрушения на основе классической, градиентной и циклической теорий пластичности.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):

использованы численные и экспериментальные методы исследования механизмов, закономерностей и траекторий развития трещин при смешанных формах циклического деформирования с применением современных вычислительных комплексов,

электронных и оптических цифровых систем для основных классов конструкционных металлических материалов в полном диапазоне смешанных форм деформирования;

раскрыты особенности распределений коэффициентов интенсивности напряжений и показателя сингулярности в вершине трещины для нормального отрыва и смешанных форм разрушения на основе упругого решения, классической, градиентной и циклической теорий пластичности;

установлены различия в форме диаграмм усталостного разрушения в зависимости от моделей нелинейного деформирования в области вершины трещины для смешанных форм деформирования и условия существования форм псевдо-нормального отрыва при начальном чистом сдвиге.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены методы численного и экспериментального исследования характеристик циклической трещиностойкости металлических материалов при смешанных формах деформирования на основе метода конечных элементов, данных электронной микроскопии и корреляции цифровых изображений;

определены количественные характеристики циклической трещиностойкости ряда конструкционных металлических материалов при смешанных формах деформирования;

представлена и обоснована возможность количественной и качественной оценки совместного влияния смешанных форм деформирования и упруго-пластических свойств металлических материалов на характеристики остаточной долговечности элементов конструкций с эксплуатационными дефектами сложной формы.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены с применением сертифицированного испытательного комплекса и поверенных высокоточных средств измерений;

теория построена на известных, проверяемых данных; полученные результаты хорошо согласуются с частными решениями доступными в литературе по смежным областям знаний;

идея базируется на обобщении передового опыта по модельным представлениям, численному и экспериментальному исследованию смешанных форм деформирования и разрушения в конструкционных металлических материалах;

использованы апробированные численные методы, современные методы регистрации и обработки первичных экспериментальных данных;

установлено хорошее соответствие численных решений и экспериментальных результатов с данными, представленными в независимых литературных источниках.

Личный вклад соискателя состоит в выполнении анализа современного состояния исследований по теме работы, проведении экспериментальных исследований циклической трещиностойкости конструкционных материалов различных классов при смешанных формах деформирования, выполнении комплекса численных расчетов в рамках линейной теории механики трещин, классической, градиентной и циклической теориям пластичности, обобщении и интерпретации экспериментальных результатов, полученных методами конечных элементов, электронной микроскопии и корреляции цифровых изображений. Выбор направлений исследований, разработка методических

вопросов и подготовка основных публикаций по теме диссертации осуществлялись совместно с научным руководителем.

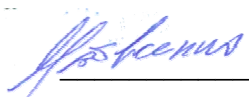
Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" № 842, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г.: в ней содержится решение задачи исследования механизмов и особенностей развития трещин при смешанных формах циклического разрушения с учетом свойств конструкционных материалов различных классов в приложении к формированию критериальной и экспериментальной базы оценки предельного состояния материалов при сложном многофакторном воздействии с использованием уникального испытательного оборудования, привлечением передовых вычислительных комплексов и электронных и цифровых средств прямых наблюдений.

На заседании 29 апреля 2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Федотовой Д.В. ученую степень кандидата физико-математических наук.


При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человека, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введено на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 16, против – 0, не проголосовало – 0.

Председатель
диссертационного совета Д 004.036.01
д.т.н., профессор, академик РАН
Матвеев Валерий Павлович

 / Матвеев В.П.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 004.036.01
д.ф.-м.н., доцент
Зуев Андрей Леонидович



 / Зуев А.Л.

30 апреля 2024 г.

М.П.