

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук

Селютиной Нины Сергеевны

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 на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела

Диссертация посвящена разработке численного и экспериментального подхода для исследования механизмов и особенностей развития трещин при смешанных формах циклического деформирования и разрушения на примере сталей (P2M и 34X), титанового (Ti-6Al-4V) и алюминиевого (AA 7050) сплавов. Сложность прогнозирования смешанных форм циклического деформирования и разрушения состоит в непредсказуемости направления и траектории роста трещины. В связи с отсутствием системного подхода в данном направлении в нелинейной механике разрушения развитие расчетно-экспериментального метода исследования механизмов и особенностей развития трещин при смешанных формах циклического разрушения является актуальной задачей механики деформируемого твердого тела.

Полученные результаты являются новыми, перспективными и будут интересны для широкого круга специалистов, работающих в области механики деформируемого твёрдого тела. В связи с вышеизложенным, **актуальность** диссертационной работы не вызывает сомнений.

Представленная диссертация Д.В. Федотовой состоит из введения, четырех глав основного содержания, заключения и списка цитируемой литературы. Материал изложен на 168 страницах, содержит 64 рисунка, 17 таблиц, список литературы состоит из 224 наименований. Список процитированной литературы содержит 224 источника.

**Во введении** сформулированы актуальность, цель и задачи работы, подчеркнуты научная новизна работы и степень достоверности результатов, сформулирована теоретическая и практическая значимость работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, описаны апробация результатов и личное участие соискателя в получении результатов.

В **первой главе** представлен обзор экспериментальных образцов и оборудования для реализации смешанных форм разрушения. Приведены известные в литературе упругопластические модели состояния и развития трещин при смешанных формах

деформирования и линейные и нелинейные критерии, и параметры сопротивления росту трещин в экспериментальной и вычислительной механике разрушения. Рассмотрены перспективы использования количественной фрактографии и метода корреляции цифровых изображений с привлечением бесконтактных оптических систем в задачах анализа поверхностей разрушения. Дается подробная поставка задачи.

**Во второй главе** изложены основные методические вопросы экспериментальных исследований, оптических и цифровых измерений роста трещин при смешанных формах деформирования. В частности, обсуждается метод эквивалентных трещин при описании криволинейной траектории нагружения в CTS (compact tension shear specimen) образце, предлагается методика измерения полей перемещений в CTS образце на основе корреляции цифровых изображений, а также представлены экспериментальные данные развития трещин в сталях, алюминиевом и титановом сплавах.

**В третьей главе** представлены расчетно-экспериментальные поля параметров напряженно-деформированного состояния, результаты расчетов коэффициентов интенсивности напряжений и показателей сингулярности для смешанных форм циклического разрушения по линейной и нелинейным теориям механики трещин.

Численный анализ НДС образцов выполнен в соответствии с моделями упругого и пластического деформирования в вершине трещины по классической, градиентной и циклической теориям пластичности.

**В четвёртой главе** представлены результаты комплексных расчетно-экспериментальных исследований развития усталостных трещин для сталей, алюминиевого и титанового сплавов при смешанных формах циклического разрушения на основе численных расчетов и количественной фрактографии.

**В заключении** сформулированы основные выводы по результатам выполнения диссертационного исследования и рекомендации к их практическому использованию, среди которых необходимо отметить:

1. Разработан и реализован комплексный метод исследования и интерпретации характеристик циклической трещиностойкости металлических материалов при смешанных формах деформирования на основе МКЭ, количественной фрактографии и корреляции цифровых изображений.

2. Для экспериментальных траекторий роста трещин численно на основе МКЭ получены и описаны распределения локальных упругих и упруго-пластических характеристик состояния материала по классической, градиентной и циклической теориям пластичности для смешанных форм деформирования, включая поля параметров НДС, коэффициенты интенсивности напряжений, плотности дислокаций и типа сингулярности.

3. Проведен сравнительный анализ 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.

4. Экспериментально установлены и подтверждены фрактографическим анализом закономерности и особенности развития трещин в сталях, титановом и алюминиевом сплавах при смешанных формах циклического разрушения.

Д.В. Федотовой хорошо сформулированы следующие пункты **научной новизны**:

Разработан комплексный метод исследования механизмов и особенностей развития трещин при смешанных формах деформирования основных классов конструкционных металлических материалов;

Дается обобщение и описание совместного влияния смешанных форм деформирования и упругопластических свойств сталей, титанового и алюминиевого сплавов на характеристики циклической трещиностойкости посредством новой формы нормализации диаграмм усталостного разрушения;

Дается сравнительный анализ распределений коэффициентов интенсивности напряжений и показателя сингулярности в вершине трещины по упругому решению, классической, градиентной и циклической теориям пластичности для нормального отрыва и смешанных форм разрушения;

Устанавливаются различия в поведении диаграмм усталостного разрушения в зависимости от моделей нелинейного деформирования в области вершины трещины для смешанных форм деформирования;

Определяются зоны доминирующих механизмов разрушения по данным электронной сканирующей микроскопии, корреляции цифровых изображений, и трактовке фрактографических особенностей процессов циклического разрушения сталей, алюминиевого и титанового сплавов при нормальном отрыве и смешанных формах деформирования.

Анализ **обоснованности и достоверности** полученных результатов позволяет утверждать, что результаты диссертации получены с использованием современных физико-математических моделей, математических методов и алгоритмов. Моделирование рассматриваемых процессов выполнено с соблюдением всех принципов вычислительной математики. Полученные результаты достоверны и не противоречат общефизическим принципам и ранее опубликованным данным.

Д.В. Федотовой получены новые научные результаты, которые вносят вклад в развитие методов механики деформируемого твёрдого тела, новые представления о нелинейной механике разрушения конструкционных материалов.

Практическая значимость работы состоит в обосновании возможности количественной оценки влияния вида смешанных форм деформирования и упругопластических свойств материалов на характеристики остаточной долговечности элементов конструкций с эксплуатационными дефектами сложной формы. Особую важность практической значимости работы составляют установленные карты фрактографии поверхностей разрушения, которые могут быть использованы в порядке экспертных оценок при обосновании конструктивно-технологических решений безопасной эксплуатации элементов конструкций.

Диссертация Д.В. Федотовой выполнена в целом на хорошем уровне, однако при ее чтении возникает ряд вопросов и замечаний, например:

#### **Список замечаний по диссертации и автореферату**

1. В работе предлагается своя методика и свой эксперимент для исследования механизмов и особенностей развития трещин при смешанных формах циклического разрушения. Проведено моделирование на основе классической теории пластичности, градиентной теории пластичности и циклической теории пластичности. Почему отсутствует сравнение хотя бы одного эксперимента из литературы, проведенного другими авторами, чтобы проверить предложенную методику?
2. В работе были проведены эксперименты с CTS образцами. В работе не обсуждается выбор CTS образцов. Есть ли другие стандартизированные образцы для моделирования других смешанных форм разрушения?
3. В главе 1 часто вводятся переменные без пояснения, что они обозначают.

Замечания, высказанные по работе, носят дискуссионный характер и не влияют на общую положительную оценку работы.

Результаты, представленные в диссертации, докладывались на авторитетных российских и международных конференциях. Автором опубликовано по теме диссертации 9 работ в научных журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, 7 из которых индексируются в Web of Science и Scopus. Автореферат в полной мере передает содержание диссертационной работы. Также стоит отметить активное участие Д.В. Федотовой в проектах РНФ и РФФИ.

Принимая во внимание всё вышеизложенное, считаю, что диссертация Дарьи Витальевны Федотовой является завершённой научно-квалификационной работой, в

которой содержится решение ряда актуальных научных задач механики деформируемого твёрдого тела.

Диссертационная работа по актуальности выбранной темы, уровню проведенных исследований, научной и практической значимости, а также степени обоснованности результатов полностью удовлетворяет требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в ред. От. 18.03.2023 г.), предъявляемым на соискание ученой степени кандидата наук, и соответствует специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела. Автор диссертации Федотова Дарья Витальевна достойна присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Я, Селютина Нина Сергеевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

**Официальный оппонент**

Старший научный сотрудник  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет»,  
доктор физико-математических наук (1.1.8)

Селютина Нина Сергеевна

09.04.2024 г.

198504, Россия, Санкт-Петербург,  
Старый Петергоф, Университетский пр., д. 28  
Математико-механический факультет СПбГУ  
Сайт: <https://math.spbu.ru/rus/>  
Тел.: +79111173598  
E-mail: [nina.selutina@gmail.com](mailto:nina.selutina@gmail.com)

