



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26, факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,
ИНН 6316000632, КПП 631601001

09 АПР 2024

№ 104-1659

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор проректор
по научно-исследовательской работе


Проккофьев А.Б.

« 9 » апреля 2024 года

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Федотовой Дарьи Витальевны
на тему «Анализ смешанных форм циклического разрушения сталей,
алюминиевого и титанового сплавов на основе МКЭ, количественной
фрактографии и корреляции цифровых изображений», представленную
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.8. - Механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы

Диссертация Д.В. Федотовой посвящена важным и актуальным вопросам современной механики разрушения – разработке и обоснованию методики численного и экспериментального исследования роста трещины в металлах и сплавах в условиях смешанного (комбинированного) нагружения, в условиях одновременного воздействия растягивающей и сдвиговой нагрузки на образец с трещиной. В диссертации представлена методика анализа роста трещины, опирающаяся на численное моделирование и экспериментальное исследование образцов с надрезами, выполненных из сталей, алюминиевого и титанового сплавов для нормального отрыва и начального чистого сдвига.

Численный анализ напряженно-деформированного состояния выполнен в рамках упругопластической постановки задачи 1) для материалов, подчиняющихся классическому степенному закону деформационной теории пластичности и 2) для материалов, следующих градиентной и циклической теориям пластичности.

В рамках диссертационной работы Д.В. Федотова выполнила широкий вычислительный эксперимент, нацеленный на моделирование роста трещины с помощью метода конечных элементов, наряду с которым проведен сложный

экспериментальный анализ нагруженных образцов с трещинами методом корреляции цифровых изображений. Впоследствии было проведено сравнительное сопоставление расчетных и экспериментальных результатов исследования роста трещины в упрочняющихся упругопластических материалах с использованием нескольких теорий упругопластического деформирования. Все указанные причины обуславливают актуальность диссертационного исследования Дарьи Витальевны Федотовой.

Структура и содержание работы

Работа состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения и списка литературы. Первая глава «Проблемы и перспективы механики смешанных форм разрушения» посвящена общим вопросам смешанного нагружения, возможности его экспериментальной реализации, разработанным к настоящему времени упругопластическим решениям задач механики трещин, параметрам механики трещин, характеризующим разрушение и рост трещины в условиях упругого и упругопластического режимов деформирования, экспериментальным методам механики разрушения и подходам анализа поверхностей разрушения.

Вторая глава «Методы экспериментального исследования и цифровых измерений роста трещин при смешанных формах отрыва и сдвига» описывает использованные в эксперименте материалы, экспериментальное оборудование, средства измерений и различные программы испытаний. Подробно обсуждается метод корреляции цифровых изображений. В главе приведены экспериментально полученные траектории трещин в условиях начального чистого сдвига, экспериментальные кривые роста трещин для сталей и сплавов для нормального отрыва и начального чистого сдвига.

Третья глава диссертационной работы «Поля параметров НДС и коэффициенты интенсивности напряжений для смешанных форм разрушения по линейным и нелинейным теориям механики трещин» описаны классические уравнения механики деформируемого твердого тела, необходимые для математической постановки задач отыскания напряженно-деформированного состояния у вершины трещины в упругом и упругопластическом материалах. Подробно описана постановка задачи в упругой постановке, приведены постановка краевой задачи в упругопластической постановке с использованием деформационной теории пластичности, приводящая к классическому решению Хатчинсона-Райса-Розенгрена. В третьей главе диссертации также приводится упругопластическая постановка задачи на основе соотношений градиентной теории пластичности, получившей в последнее время широкое применение и распространение. В этой же главе описываются основные положения циклической теории пластичности. Таким образом, в третьей главе дан обзор различных определяющих соотношений, наиболее часто используемых для решения граничных задач механики разрушения и выделены основные параметры, характеризующие напряженно-деформированное состояние у

вершины трещины. В третьей главе представлены результаты конечно-элементных расчетов нагружения CTS образцов из сталей, алюминиевого и титанового сплавов с привлечением градиентной и циклической теорий пластичности и проведен анализ коэффициентов интенсивности напряжений упругого и упругопластического решений, полученных на основании деформационной, градиентной и циклической теорий пластичности. Третья глава завершается сравнением распределений деформаций в непосредственной окрестности вершины трещины, найденных в соответствии с деформационной теорией пластичности для степенного закона упрочнения, градиентной и циклической теориями пластичности.

Четвертая глава диссертации «Характеристики циклической трещиностойкости сталей, алюминиевого и титанового сплавов при смешанных формах разрушения» посвящена интерпретации и анализу экспериментальных данных с целью получения скорости роста трещины как функций выбранных параметров механики разрушения для упругого и упругопластического режимов деформирования.

В заключении сформулированы итоги выполненного исследования и представлены рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Научная новизна полученных результатов

Научная новизна диссертационной работы заключается в создании, разработке и экспериментальном обосновании интегрального метода исследования механизмов и особенностей развития трещин при смешанных формах деформирования основных классов конструкционных металлических материалов, базирующегося на объединении численного и экспериментального подходов; обобщении и описании совместного влияния смешанных форм деформирования и упругопластических свойств сталей, титанового и алюминиевого сплавов на параметры трещиностойкости в условиях усталостного нагружения посредством новой формы нормализации диаграмм усталостного разрушения; сравнительном анализе распределений коэффициентов интенсивности напряжений и показателя сингулярности в окрестности вершины трещины в соответствии с упругим решением и решениями классической, градиентной и циклической теориями пластичности для трещины нормального отрыва и смешанных форм разрушения; обнаруженных особенностях в поведении диаграмм усталостного разрушения в зависимости от моделей нелинейного деформирования в области вершины трещины для смешанных форм деформирования; в определении областей доминирующих механизмов разрушения по данным электронной сканирующей микроскопии, корреляции цифровых изображений, и интерпретации фрактографических закономерностей процессов циклического разрушения сталей, алюминиевого и титанового сплавов в условиях нормального отрыва и смешанных формах деформирования.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в возможности количественной оценки влияния скорости роста трещины в условиях комбинированных форм деформирования и оценки влияния упругопластических свойств материалов на характеристики 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.

Несомненным достоинством данной работы является сочетание и взаимное применение численных и экспериментальных методов анализа напряженно-деформированного состояния у вершины трещины для исследования упругопластического отклика конструкции сложной геометрии, находящейся под действием комбинированных систем нагружения.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается применением физически обоснованных математических моделей, использованием апробированных методов исследования, установленными совпадениями частных численных и аналитических решений с решениями других авторов, а также результатами экспериментальных исследований, выполненных в рамках данной работы.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на всероссийских и международных конференциях. Опубликовано 9 статей, входящих в перечень ВАК и международные базы данных Web of Science и Scopus, среди которых три статьи опубликованы в журналах с квартилем Q1.

По диссертации можно сформулировать ряд замечаний.

1. В литературном обзоре в первой главе диссертационной работы отсутствуют ссылки на работы Е.М. Морозова и В.И. Астафьева по общим проблемам нелинейной механики разрушения и вопросам анализа напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещины в материалах со степенным законом упрочнения в условиях смешанного деформирования.

2. В тексте диссертационной работы присутствуют опечатки. Так, в разделе краевая задача линейного упругого решения (причем лучше этот раздел назвать краевая задача в упругой постановке) все дифференциальные уравнения – уравнения равновесия (3.1.1), соотношения Коши (3.1.2), условия совместности деформаций (3.1.4) приведены без использования знака частной производной.

3. В уравнениях (3.1.5), (3.1.6), (3.1.8), (3.1.11), (3.1.12), (3.1.14), (3.1.15), (3.1.24) пропущены скобки, выделяющие аргументы функций. В уравнении (3.1.8) необходимо более четко прописать размерности для составляющих скорости высвобождения упругой энергии и эффективного коэффициента интенсивности напряжений.

4. В третьей главе (параграф 3.1) подробно изложены решения краевой задачи о трещине в упругой и пластической постановке в формулировках М. Уильямса и Хатчинсона-Райса-Розенгрена. Для более новых моделей – градиентной теории пластичности и циклической теории пластичности приведены уравнения для простого одноосного растяжения без адресации к сложному напряженному состоянию. Не ясно, какие именно соотношения были включены в расчетную схему конечно-элементного комплекса при его реализации на платформе вычислительного комплекса ANSYS. Краевая задача циклической теории пластичности нуждается в более полном изложении, поскольку этой теме посвящены лишь три страницы диссертации в третьей главе.

5. Сильной стороной и основным достижением рассматриваемой диссертации являются проведенные конечно-элементные вычисления и их анализ, а также выполненные эксперименты методом корреляции цифровых изображений. В диссертационной работе при описании сеток недостаточно дано описание того, как получена траектория роста трещины, изображенная на рис. 3.2.3а и каким образом траектории воспроизводились в рамках конечно-элементных расчетов с учетом свойств материалов. Смогут ли в данных расчетах помочь расширенный метод конечных элементов, посредством которого можно получить расчетную траекторию распространения?

6. В диссертационной работе на стр. 93-94 представлены результаты расчета, полученные в соответствии с циклической теорией пластичности. Не ясно, какие именно определяющие соотношения использовались и реализована ли эта теория во множестве классических моделей расчетного комплекса ANSYS? Следовало представить более детальное изложение процедуры и результатов моделирования циклического нагружения с учетом поцикловой кинетики упруго-пластических напряжений.

7. В диссертационной работе указывается, что одной из задач диссертации является выполнение численного анализа полей напряженно-деформированного состояния (НДС), упругих и упругопластических параметров сопротивления разрушению в полном диапазоне смешанных форм разрушения. На рис. 3.4.4 приведены зоны пластических деформаций при нормальном отрыве, чистом сдвиге и для смешанного деформирования, которое очень близко к нормальному отрыву и автором называется псевдо-нормальным отрывом. Можно ли в этом случае говорить о полном диапазоне смешанных форм нагружения? Фактически для избранной геометрии образца и системы нагружения осуществляется быстрый переход от чистого начального сдвига к формам, близким к нормальному отрыву.

8. Автор диссертационной работы часто прибегает к сопоставлению расчетных результатов, полученных с помощью различных теорий упругопластического деформирования, и (или) результатов экспериментальных исследований. Эти сопоставления и сравнения являются

чисто визуальными без количественной оценки различий численного и экспериментальных подходов.

9. В тексте указано, что уделено внимание анализу чувствительности сетки к топологии. Далее по тексту присутствует только анализ в зависимости от размера элемента (плотность сетки). Анализировались ли КЭ модели, выполненные треугольными элементами? Рассматривались ли КЭ модели, выполненные элементами второго порядка (например, 8-узловые квадратичные элементы)?

10. Чем объясняется резкое падение интенсивности напряжений в зоне пластической деформации (на рисунке 3.2.4 у вершины трещины желтый треугольник, рис. 3.2.4 а), б), в) и г)))? По всей видимости, данная область должна быть красного цвета.

11. На рис. 3.2.2 (стр. 77) приведена типичная сетка конечных элементов с радиусом выреза, равным 60 нанометрам. Межатомное расстояние для алюминия составляет 3.986 ангстрем, т.е. на данном расстоянии 60 нанометров могут разместиться 150 атомов алюминия. Справедливы ли гипотезы сплошности на указанных масштабах? На данных расстояниях необходимо учитывать кристаллическое строение материала и использовать дискретные подходы (ab initio и метод молекулярной динамики).

Отмеченные замечания, пожелания и вопросы не отменяют общего положительного впечатления от работы.

Заключение

Диссертационная работа Федотовой Д.В. «Анализ смешанных форм циклического разрушения сталей, алюминиевого и титанового сплавов на основе МКЭ, количественной фрактографии и корреляции цифровых изображений» содержит новые вычислительные и экспериментальные результаты и положения, представляющие научный интерес и обладают научной значимостью. Диссертационная работа Д.В. Федотовой характеризуется полнотой и завершенностью, ясно и грамотно написана, хорошо проиллюстрирована графиками и рисунками. Диссертационная работа выполнена автором на современном уровне с привлечением современных вычислительных средств и современного экспериментального оборудования. Представленные в диссертации результаты достоверны, выводы обоснованы. Применяемые в работе подходы могут быть использованы при изучении актуальных задач нелинейной механики разрушения.

Содержание диссертации достаточно полно и правильно отражено в автореферате.

Уровень диссертации Д.В. Федотовой «Анализ смешанных форм циклического разрушения сталей, алюминиевого и титанового сплавов на основе МКЭ, количественной фрактографии и корреляции цифровых изображений» соответствует требованиям Положения о присуждении ученых

степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор – Федотова Дарья Витальевна – заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. - Механика деформируемого твердого тела.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры математического моделирования в механике Самарского университета 2 апреля 2024 года, протокол заседания № 10.

Доцент кафедры математического
моделирования в механике
Самарского университета
к.ф.-м.н.

Бахарева Юлия Николаевна

Заведующий кафедрой математического
моделирования в механике
Самарского университета
д.ф.-м.н.

Степанова Лариса Валентиновна

Федеральный государственный автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самарский университет)
Почтовый адрес: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34
Тел. (846) 335-18-26 (приемная ректора) (846) 267-43-70 (канцелярия)
Адрес электронной почты ssau@ssau.ru
Web-сайт организации: <http://ssau.ru>