

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Косова Дмитрия Александровича «Прогнозирование усталости и развития трещин на основе связанных континуальных моделей и фазовых полей разрушений», представленную по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела, на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа Д.А. Косова представляет собой значимое комплексное исследование, объединяющее теоретические разработки, эксперименты и компьютерное моделирование с элементами практических приложений, которые принадлежат решению задач прогнозирования ресурса материалов и элементов конструкций на стадиях зарождения и развития дефектов. Проблемы безопасной и экономически целесообразной эксплуатации элементов конструкций при сложных видах длительного статического и циклического многоосного нагружения являются актуальными для машиностроения, включая энергетику, авиацию и трубопроводный транспорт.

Одним из основных направлений механики деформируемого твёрдого тела является разработка научно обоснованных и практически применимых моделей, позволяющих учитывать процессы накопления повреждений и разрушения при эксплуатационных нагрузках. Постановка подобных задач и их решение, сопряжённые с высокой вычислительной и экспериментальной затратностью, доступны весьма ограниченному числу научных коллективов, что подчеркивает актуальность проведённого Д.А. Косовым исследования.

В поисковых исследованиях и инженерных приложениях механизмы накопления и эволюции повреждений считаются определяющими в процессе перехода от микродефектов к макротрещинам. Для их корректного учёта на этапе проектирования необходимы модели, способные описывать накопление повреждений на различных масштабных уровнях. С этой целью активно развиваются подходы механики повреждённости и фазовых полей разрушения, и их сочетание.

Диссертационная работа Д.А. Косова вписывается в современные тренды расчетно-экспериментальных исследований по обеспечению приложений концепции допускаемой повреждаемости в наукоемком машиностроении. В диссертации предложен новый комплексный расчётно-экспериментальный подход, в рамках которого разработанная связанная континуальная модель повреждённости сопряжена с методом фазовых полей разрушения. Существенным вкладом автора является также предложенная методика определения параметров модели, основанная на использовании численных алгоритмов по интерпретации экспериментальных данных. Подобный подход обеспечивает надёжную идентификацию характеристик материала и повышает достоверность прогноза долговечности на стадиях образования и развития дефектов.

В первой главе диссертационной работы представлен литературный обзор, охватывающий теоретические основы, модельные представления и особенности существующих подходов к моделированию процессов деформирования и разрушения материалов, включая классические концепции линейной механики разрушения, а также более современные модели континуальной механики повреждённости и фазовых полей разрушений. Особое внимание уделено современным численным и экспериментальным исследованиям по оценке долговечности конструкционных материалов и прогноза роста трещин.

На основании проведённого обзора автором обоснована необходимость разработки комплексного подхода, сочетающего математическое моделирование и эксперимент, для адекватного описания процессов разрушения материала. Сформулированы цели и задачи исследования, направленные на реализацию расчётно-экспериментального метода прогнозирования характеристик долговечности конструкционных материалов с использованием современных моделей механики повреждённости и фазовых полей разрушения.

Во второй главе представлена реализация комплексного подхода к моделированию процесса образования трещины в материалах при циклическом нагружении в условиях сложного напряжённого состояния. Основу предложенного подхода составляет модель повреждённости Lemaitre, расширенная с учётом механизмов изотропного и кинематического упрочнения.

Для реализации модели разработан численный алгоритм, интегрированный в среду конечно-элементного комплекса ANSYS в виде динамически подключаемой библиотеки. Такая архитектура обеспечивает гибкость применения и возможность использования разработанной методики в инженерных расчётах без необходимости вмешательства в исходный код основного программного ядра. Особое внимание уделено методике параметризации модели. Автор применяет численные методы идентификации, базирующиеся на анализе результатов испытаний, что позволило обеспечить согласование расчётных предсказаний с реальными экспериментальными данными.

Надёжность и обоснованность развиваемого подхода подтверждаются воспроизведением известных данных из литературы, а также результатами собственных малоцикловых испытаний образцов из стали P2M. Модель продемонстрировала способность воспроизводить наблюдаемые закономерности деформирования и накопления повреждений, что подчёркивает её научную состоятельность и прикладную значимость в составе работ по прогнозированию долговечности материалов и элементов конструкций.

В третьей главе диссертации изложены разработка и численная реализация модели фазового поля разрушения, предназначенной для описания

процессов роста трещин на разных масштабных уровнях. В отличие от традиционных методов, модель использует диффузное описание зоны повреждений, что позволяет отказаться от явного отслеживания положения фронта трещины и тем самым значительно упростить постановку и решение задач разрушения в телах произвольной геометрии.

Приоритетом вычислительного толка выполненной реализации является адаптация метода фазового поля в среде программного комплекса ANSYS, включая разработку нового конечного элемента, специально предназначенного для моделирования эволюции трещин с учётом деградации свойств материала при статических и циклических нагрузках. Данный результат позволил воспроизвести не только стандартные сценарии роста трещин, но и моделировать их поведение при смешанных модах разрушения, что особенно актуально для инженерных приложений.

Особое внимание в численных результатах главы 3 уделено моделированию поведения поверхностных и полуэллиптических дефектов, в том числе при двухосном нагружении, а также взаимодействию нескольких трещин. Проведённые расчёты демонстрируют высокую прогностическую способность реализованной модели в трёхмерных задачах с корректным учетом полей напряжений и формы зоны повреждённости.

Важным результатом работы является применение модели фазовых полей разрушения к задачам мезомасштабного моделирования роста трещин путем формирования кристаллической структуры материала на основе диаграмм Вороного. Данное решение позволило учесть влияние микроструктуры материала на реализацию межзеренного и внутризеренного доминирующих механизмов разрушения.

Комплекс проведённых верификационных тестов подтвердил качественное и количественное соответствие расчётных результатов с собственными и литературными экспериментальными данными.

Четвёртая глава диссертационной работы относится к приложениям разработанных моделей механики повреждённости и фазового поля разрушения в задачах прогнозирования характеристик долговечности элемента диска паровой турбины при эксплуатационных циклических нагрузках.

Автором представлена реализация разработанного комплексного подхода, сочетающего экспериментальные данные и численное моделирование для анализа долговечности на стадиях образования и развития дефектов в проушине вращающегося диска паровой турбины. Параметры использованных моделей определены на основе специальных малоцикловых испытаний образцов и имитационной модели, что позволило обеспечить адекватное описание процессов накопления повреждений. На основе связанной континуальной модели выполнен расчёт долговечности на стадии образования дефекта, а результаты верифицированы по отношению к экспериментальным данным.

Моделирование развития исходной поверхностной трещины в заклепочном замковом соединении лопатки с диском турбины выполнено с использованием трёхмерной модели фазового поля разрушения в условиях сложного напряжённого состояния. Реализация модели в МКЭ коде ANSYS с применением сформированного пользовательского элемента позволила воспроизвести траекторию распространения дефекта и определить долговечность проушины на стадии роста поверхностного дефекта.

Значимым результатом главы является комплексная интеграция двух моделей нелинейной механики деформирования и разрушения в рамках единой вычислительной процедуры при прогнозных оценках характеристик долговечности элемента диска турбины.

Замечания по диссертационной работе.

1. На рис. 2.4.11 представлены результаты «...сопоставления расчетных и экспериментальных данных по долговечности образцов из стали Р2М». Но сопоставление идет только по малому промежутку циклов (от 200 до 1000). В то время как в эксперименте получены результаты до 50000 циклов. Неясно, почему не были проведены расчеты по большему диапазону циклов.
2. На рис. 4.3.1 приведены сравнения результатов автора с экспериментальными данными для диска (рис.14 в автореферате). Из них следует, что при количестве циклов более 6000 параметры поврежденности начинают отличаться более чем в 1,5 раза. Аналогичная ситуация имеет место при сравнении результатов автора с данными расчета Robert Lee Gates на рис.2.2.5. Очень хорошее согласование имеет место до значений параметра поврежденности менее 0,5. Видимо в дальнейшем необходимо провести модернизацию используемых моделей при достаточно больших значениях циклов или принимать немалый коэффициент запаса по долговечности.
3. Обоснование разработанных автором моделей в каждом случае сравнения дано только на примере одного материала. Желательно в дальнейшем применить эти модели в отношении других классов материалов.
4. Имеется ряд замечаний по терминологии. Например, на стр. 95 при рассмотрении уравнений (3.1.17) и (3.1.18) автор указывает на разложение энергии на отдельные компоненты. Однако энергия является скалярной физической величиной. Поэтому её интерпретация через «компоненты» требует пояснения. Аналогично, принцип минимума потенциальной энергии формулируется для упругих тел. Если же появляются неупругие деформации, то нужно ссылаться на принцип Лагранжа. Термин «определяющие соотношения» используется в виде синонима к физическим соотношениям, но не к уравнениям равновесия, как это написано в автореферате.

Представленные замечания не снижают общую положительную оценку выполненной Д.А. Косовым диссертации. Автореферат в полной мере отражает содержание представленной к защите диссертационной работы

В целом работа Д.А. Косова демонстрирует обоснованную структурную взаимосвязь выполненных разделов и последовательности экспериментальных и расчётных этапов работы, в рамках которых получены новые теоретические, численные, испытательные и методические результаты. На этой основе, заявленные автором элементы научной новизны, положения, выносимые на защиту и выводы по достижению цели работы убедительно аргументированы и подтверждены соответствующими разделами текста диссертации. Достоверность полученных результатов подтверждается проведённой верификацией численных моделей, а также валидацией в рамках качественного и количественного сравнения полученных численных данных по отношению к экспериментальным измерениям и хорошим согласием с известными литературными данными других авторов.

Диссертационная работа Д.А. Косова посвящена решению задачи прогнозирования характеристик долговечности материалов и элементов конструкций с применением разработанных континуальных моделей повреждённости и фазовых полей разрушения. В рамках исследования автором реализованы численные методы на основе МКЭ, позволяющие учитывать сложное напряжённое состояние, структуру материала, нелинейные эффекты деформирования и эволюцию повреждений.

К практическим приложениям работы относятся расчёты и моделирование процессов накопления повреждений и роста трещин в проушине диска паровой турбины. Проведённый анализ позволил количественно оценить стадии зарождения дефекта и его последующего распространения при эксплуатационном нагружении, что подтверждает прикладную значимость и применимость разработанного подхода.

Диссертация хорошо организована по структуре представления и взаимосвязи разделов и последовательно изложена. Содержание диссертации носит завершённый характер, текст аккуратно оформлен, основные результаты работы опубликованы в 13 ведущих отечественных и зарубежных изданиях, три из которых соответствуют первому квартилю мировой базы данных.

На основании комплексного использования современного уникального испытательного оборудования, а также контактных и дистанционных средств измерений, разработанного и численно реализованного моделирования развития трещин, и полученных обобщённых результатов, работа Д.А. Косова заслуживает высокой оценки и имеет хорошие перспективы продолжения в части учёта вклада дополнительных физических явлений в характеристики циклической трещиностойкости конструкционных материалов.

Таким образом, диссертация соответствует по содержанию и достигнутым в ней результатам паспорту специальности 1.1.8. — механика

деформируемого твёрдого тела, а её автор, Косов Дмитрий Александрович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:
профессор кафедры механики
Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Казанский
государственный архитектурно-
строительный университет», доктор
физико-математических наук
(01.02.04 — Механика деформируемого
твёрдого тела), профессор



Рашит Абдулхакович Каюмов

Email: kayumov@rambler.ru

Подпись Каюмова Р.А. заверяю:

проректор КГАСУ по НИР, к.т.н.



25 сентября 2025 г.

Евгений Анисимович Вдовин

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»

420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул.
Зеленая, 1

Телефон: +7 (843) 510-46-0

Сайт: <https://www.kgasu.ru>

E-mail: kgasu@kgasu.ru