

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.

Актуальность темы. Работа посвящена прогнозированию долговечности материалов и элементов конструкций на стадиях образования и распространения трещин, что представляет собой одну из приоритетных задач в обеспечении надёжности и безопасности инженерных систем. Актуальность исследования обусловлена необходимостью описания и моделирования механизмов накопления повреждений в твёрдых телах, приводящих к снижению несущей способности и разрушению при переменных нагрузках. Элементы конструкций, как правило, работают в условиях сложного напряжённого состояния, включающего сочетание статических и циклических нагрузок при многоосном деформировании. Подобные условия требуют применения моделей, способных учитывать смешанные формы деформирования и разрушения. Особое значение приобретает развитие расчётных методов, позволяющих в рамках единого численного подхода описывать процессы на стадии образования повреждений и развития дефектов в рамках расчетов общей долговечности.

Представленная Д.А. Косовым диссертационная работа является актуальной с точки зрения развития методов континуальной механики повреждённости в расчетах долговечности в сочетании с передовым методом фазовых полей разрушения, позволяющим описывать распространение трещин. В работе представлена разработка и численная реализация нового расчётно-экспериментального метода прогнозирования долговечности при малоцикловом нелинейном деформировании в условиях сложного напряженного состояния. Полученные в рамках представленной 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 вызывают сомнений. Они обеспечены грамотной формулировкой цели и задач, системным характером проведения исследования, использованием современных вычислительных и экспериментальных методов, а также согласованием полученных данных с результатами смежных исследований, представленных в литературе.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка использованной литературы. Материал изложен на 154 страницах,

содержит 84 рисунка, 12 таблиц, список литературы состоит из 234 наименований.

Во **введении** отражены актуальность диссертационной работы, уровень разработанности темы, цель и задачи исследования, научная новизна, методология и методы моделирования, положения, выносимые на защиту, достоверность результатов и личный вклад автора.

В **первой главе** автором представлен обзор, в рамках которого проанализировано современное состояние исследований в области прогнозирования долговечности элементов конструкций с учётом процессов малоциклового усталости и развития трещин. Особое внимание уделено моделям, учитывающим нелинейные эффекты деформирования при сложных формах нагружения, включая многоосные и циклические воздействия. Отмечена перспективность интеграции моделей механики повреждений и разрушения для описания стадий зарождения и развития дефектов в материалах с учётом их структурных особенностей. Показано, что современные численные методы на основе континуальной механики и фазовых полей разрушения обладают достаточным потенциалом для описания механизмов накопления повреждений, образования, развития и взаимодействия трещин в условиях эксплуатационных нагрузок.

На основании проведённого анализа обоснована необходимость комплексного подхода к моделированию поведения материалов и сформулированы цель и задачи исследования, направленные на разработку и реализацию прогностических методов оценки характеристик долговечности материалов при нелинейном деформировании.

Во **второй главе** представлена разработка расчётно-экспериментального метода прогнозирования долговечности материалов на стадии образования дефектов при статическом и циклическом нагружении в условиях сложного напряжённого состояния. В основу представленного подхода положена модель накопления повреждений Lemaitre, дополненная законами изотропного и кинематического упрочнения (Voce и Armstrong–Frederick), что позволило корректно учитывать нелинейные эффекты пластического деформирования.

Автором разработаны численный алгоритм и метод реализации модели малоциклового усталости в программном комплексе ANSYS, позволяющий описать процесс накопления повреждений на стадии образования микродефектов. Существенным достижением автора является взаимосвязанная разработка и реализация численной модели с последующим экспериментальным обоснованием. В главе приведена последовательная поэтапная верификация предлагаемого подхода: на первом этапе — путём сопоставления с известными литературными данными, на втором этапе — на основе результатов собственных малоциклового испытаний образцов из стали Р2М. Полученные результаты подтвердили адекватность и практическую применимость предложенной модели.

В **третьей главе** диссертации автором сформулирована, реализована и верифицирована модель фазового поля разрушения (ФПР), предназначенная

для численного моделирования роста трещин при различных режимах нагружения. Положительной особенностью предложенного подхода является использование диффузного представления зоны повреждений для моделирования развития трещин смешанных форм разрушения и эволюции поверхностных полуэллиптических дефектов в трехмерных телах.

Разработанный метод ФПР основан на принципе минимизации полной потенциальной энергии, с учётом функций деградации материала для статического и циклического нагружения. В главе 3 диссертации проведена полноценная постановка задачи, и осуществлена верификация модели на ряде классических задач механики разрушения. Установлено качественное и количественное соответствие между расчётными и известными экспериментальными результатами из литературы.

Особое внимание уделено решению задач распространения поверхностных полуэллиптических дефектов при двухосном нагружении и решению сложной задачи взаимодействия нескольких дефектов в процессе циклического деформирования. В результате автором продемонстрирована высокая предсказательная способность метода ФПР при учёте сложного напряжённого состояния, включая эффекты смешанных форм разрушения.

Значимым достижением работы является применение метода фазовых полей разрушения к задачам мезомасштабного моделирования развития дефектов в зеренной структуре кристаллических материалов. Использование алгоритма генерации микроструктуры по методу Вороного позволило автору воспроизвести как межзеренное, так и внутризеренное разрушение, что открывает перспективы использования модели на мезомасштабном уровне по отношению к характерному размеру структуры материала. Представленные результаты подтверждают корректность реализованного подхода и его научную и прикладную значимость. Разработанная методика расширяет возможности применения фазовых моделей разрушения в инженерной практике и поисковых исследованиях.

Четвёртая глава диссертации посвящена практическому применению разработанных в предыдущих разделах моделей механики повреждений и фазовых полей разрушения для оценки долговечности элементов конструкций на примере проушины диска паровой турбины. Работа охватывает обе критически важные стадии разрушения: стадию образования дефекта и стадию последующего роста трещины.

Автором реализован комплексный расчётно-экспериментальный подход, включающий проведение экспериментов на образцах стандартной и специальной геометрии и его сопряжение с численным моделированием. Применение расчётно-экспериментального подхода позволило автору установить параметры материалов, входящие в определяющие соотношения кинематического и изотропного упрочнения. Проведён расчёт процесса накопления повреждений в элементе диска турбины при циклическом нагружении. Полученное согласие между результатами моделирования и экспериментальными данными подтверждает адекватность разработанной модели для описания долговечности на стадии образования дефекта.

Вторая часть главы посвящена моделированию стадии развития трещины с использованием метода фазовых полей разрушения. Особо стоит отметить реализацию трёхмерной постановки задачи и применение модели фазового поля в условиях сложного напряженного состояния с учётом эксплуатационных дефектов. Численные расчёты позволили получить распределение фазового поля разрушения, траектории роста трещин и значения долговечности проушины на стадии распространения дефекта. Сравнение с экспериментальными наблюдениями подтвердило состоятельность реализованной модели.

Значимым итогом проведённого исследования является обеспечение взаимодействия континуальной модели повреждений и фазового поля разрушения в рамках единой методики расчёта, что позволило получить количественно обоснованную оценку общей долговечности проушины диска турбины. Полученные результаты имеют практическую значимость для решения задач расчёта характеристик долговечности ответственных элементов энергетического оборудования и могут быть использованы для промышленной диагностики и прогнозирования отказов.

Замечания по диссертационной работе

1. Формулировка 5-го защищаемого положения выглядит непривычно для научного положения, поскольку смысл словосочетания «Инновация практического плана» не совсем очевиден.
2. В Главе 3 автор приводит иллюстрации фазовых полей, например, на стр. 89, рис. 3.1.6., стр. 92, рис. 3.1.10 и т. д. При этом не приводится расшифровка цветовой шкалы, что затрудняет восприятие показанных данных.
3. На стр. 97 автор указывает: «Размер зоны разрушения влияет как на инициирование, так и на распространение трещины, и поэтому его необходимо тщательно определять, чтобы он соответствовал физико-механическим свойствам материала с учетом параметра структуры». В работе не сообщается, что автор понимает под термином «параметр структуры», особенно в свете того, что структура может характеризоваться целым набором разнообразных параметров, в том числе на разных масштабных уровнях.
4. На стр. 106 автор указывает: «Все металлы и сплавы, затвердевшие в обычных условиях, имеют зернистое строение, то есть состоят из множества мельчайших кристалликов неправильной формы (зерен), случайным образом ориентированных в пространстве». Далее на стр. 108 сообщается: «Для моделирования ячеистой структуры был использован подход на основе мозаики (диаграммы) Вороного [110]». Во-первых, словосочетание «зернистая» структура является непривычным в среде металлофизиков. Во-вторых, видимо под «ячеистой» автор также понимает зеренную структуру.
5. На стр. 111 на рис. 3.4.5 приведены примеры межзеренного разрушения (а) и внутризеренного разрушения (б) в фазовых полях разрушения». Далее на стр. 112 сообщается, что «в данном расчете было принято соотношение модулей упругости между телом зерна и межзеренной границей, равное 0.7.

Это соотношение показывает, что модуль упругости межзеренной границы составляет 70% от значения упругости зерна. Подобный же результат был достигнут за счет изменения значений критической скорости выделения энергии G_c для тела зерна и его границы». Как правило, для сплавов с зеренной структурой характерен один доминирующий механизм разрушения и не факт, что определяющим фактором является модуль упругости материала в теле на границе зерен. Таким образом, получаемый результат зависит от заданных условий расчета и в данном случае не учитывает многих структурных особенностей исследуемого материала.

6. На стр. 122 автор сообщает: «испытания на усталость проводились при комнатной температуре с коэффициентом асимметрии номинальных напряжений $R = 0,01$ при синусоидальной нагрузке с частотой 5 Гц». При этом не приведено обоснование столь малого значения коэффициента асимметрии цикла и предположений о возможном его влиянии на результаты расчетов.

7. На стр. 123 приведена кривая усталости, полученная в результате испытаний образцов, рисунок 4.2.3в». Далее на стр. 124 указано: «из сравнения расчетных и экспериментальных данных о прогнозировании долговечности на рисунке 4.2.3 в следует, что сформулированная модель успешно верифицирована и может быть использована для оценки несущей способности реального диска турбины». Хотелось бы видеть количественную оценку степени подобия экспериментальных и расчетных данных, чтобы вывод о верификации имел не качественно, а количественное выражение.

Указанные замечания носят частный характер, не касаются сути выносимых на защиту положений и выводов, а также не сказываются на общей положительной оценке диссертации.

Оформление диссертации. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК, предъявляемыми 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 13 статей с определённым 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 твёрдого тела.

Заключение. Диссертационная работа Д.А. Косова производит впечатление глубоко проработанного научного исследования, отличающегося высокой степенью теоретической и прикладной проработки. Работа направлена на развитие подходов к прогнозированию долговечности материалов и элементов конструкций на всех стадиях развития дефекта. Впервые реализован расчётно-экспериментальный подход, сочетающий модели механики поврежденности и фазовых полей разрушения, что

позволило автору эффективно описывать процессы накопления повреждений и распространения трещин в условиях эксплуатационного нагружения.

Автором разработаны и верифицированы новые численные алгоритмы и реализованы пользовательские модели, разработан и введен новый тип конечного элемента в программном комплексе ANSYS с убедительной поддержкой численными и экспериментальными результатами. Существенным вкладом является предложенный метод определения параметров моделей, обеспечивающий практическую применимость разработанного подхода для анализа долговечности элементов конструкций.

Диссертационная работа Д.А. Косова является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне и содержит новые научно обоснованные результаты, имеющие существенное практическое значение. Полученные результаты могут быть использованы в задачах оценки ресурса и безопасности промышленных конструкций в энергетике, машиностроении и других отраслях.

Диссертация «Прогнозирование усталости и развития трещин на основе связанных континуальных моделей и фазовых полей разрушений» отвечает требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» П.П.9, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор Д.А. Косов заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – механика деформируемого твёрдого тела.

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

Сергей Викторович Панин



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

Наталья Юрьевна Матолыгина
«14» августа 2025 г.

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