

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ
ИМЕНИ Э.С. ГОРКУНОВА
Уральского отделения
Российской академии наук
(ИМАШ УрО РАН)

Комсомольская ул., 34, г. Екатеринбург, 620049
Тел.: (343) 374-47-25, факс: (343) 374-53-30
E-mail: ges@imach.uran.ru; http://www.imach.uran.ru
ОКПО 04538044, ОГРН 1036603482992
ИНН/КПП 6660005260/667001001

04.09.2025 № 16348/02-14-92

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
Директор ФГБУН
"Институт машиноведения им. Э.С.
Горкунова Уральского отделения
Российской академии наук"
доктор технических наук, доцент
Швейкин Владимир Павлович

«4» сентября 2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения
имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук

на диссертацию Косова Дмитрия Александровича «ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТИ И
РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН НА ОСНОВЕ СВЯЗАННЫХ КОНТИНУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ И
ФАЗОВЫХ ПОЛЕЙ РАЗРУШЕНИЙ», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого
твердого тела

Диссертационная работа Косова Дмитрия Александровича посвящена решению актуальной проблемы механики деформируемого твердого тела, связанной с моделированием поврежденности и разрушения твердых тел при внешних механических воздействиях. Непосредственной целью выполненных исследований является разработка и обоснование расчетно-экспериментальных методов прогнозирования долговечности при малоцикловой усталости и моделирования роста трещин при монотонном и циклическом нагружении на основе фазовых полей разрушения с учетом накопления и развития повреждений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Материал изложен на 154 страницах, содержит 84 рисунков, 12 таблиц, список литературы состоит из 234 наименований. Структуру диссертации следует признать удачной.

Во введении сформирована область исследования и ее актуальность, описана методология реализации работы и верификации результатов, сформулирована научная и практическая значимость решаемых задач.

В первой главе представлен подробный аналитический обзор современных достижений отечественных и зарубежных исследований в предметной области выполненных исследований. Это позволило автору логично обосновать и сформулировать задачи исследований.

Во второй главе сформулирован и обоснован метод прогнозирования малоциклового усталости на основе модели поврежденности и комбинированных законов упрочнения, представлен разработанный алгоритм и изложена процедура численной реализации метода оценки долговечности с учетом характеристик предельного состояния при многоосном статическом нагружении с использованием моделей локальных повреждений Lemaitre. Модельные представления объединены в общую структуру разрешающих уравнений и интегрированы в программный комплекс ANSYS. Реализация представленного алгоритма выполнена в виде динамически подключаемой библиотеки пользовательских материалов, что позволяет учитывать текущую поврежденность и её влияние на напряженно-деформированное состояние материалов.

В третьей главе предложена формулировка, реализация и верификация модели фазового поля разрушения (ФПР), предназначенной для прогнозирования долговечности на стадии роста трещины в материалах при различных условиях нагружения. Представлена разработка и численная реализация метода ФПР, основанная на формулировке полной энергии и составляющих плотности энергии деформации с введением дополнительных параметров масштаба поля и повреждения сплошной среды. Реализация метода фазового поля разрушения дополнена новой степенью свободы при решении трехмерных задач и функциями деградации для условий монотонного и циклического нагружения. Основное содержание третьей главы составляют результаты численных параметрических исследований в соответствии с методом фазовых полей разрушения, которые устанавливают закономерности и эффекты влияния смешанных форм деформирования и сложного напряженного состояния при развитии сквозных и поверхностных дефектов в трехмерных телах при линейном и нелинейном монотонном и циклическом деформировании. Реализованный в среде вычислительного МКЭ комплекса ANSYS метод фазовых полей разрушения был верифицирован по отношению к классическим примерам, а также представлены новые решения актуальных задач механики трещин. С использованием метода мозаики Вороного на основе фазовых полей была сделана попытка смоделировать межзеренное и внутризеренное разрушение, характерное для кристаллических тел. Разработанный подход позволяет моделировать процессы разрушения материалов с учетом взаимодействия трещин с границами зерен и их распространение внутри зерен, что дает возможность исследовать и прогнозировать поведение материалов при различных условиях нагружения на мезоуровне.

В четвертой главе представлены результаты практического приложения разработанных моделей повреждений при усталости и в фазовых полях разрушения на примере прогнозирования общей долговечности проушины диска паровой турбины, которое включает стадии образования начального дефекта и последующего развития трещины. В соответствии с разработанным методом прогнозирования долговечности проводились испытания образцов специальной геометрии, которые были направлены на изучение поведения материала при циклическом нагружении и определение констант модели повреждения, а также моделей изотропного и кинематического упрочнения материала. Полученные экспериментальные данные положены в основу численного моделирования, где конечный результат накопления повреждений и прогноза долговечности показал хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными. Интересным результатом численных расчетов являются результаты прогнозирования долговечности на стадии развития трещины, которая формирует общую долговечность проушины в виде суммы прогнозируемой долговечности на стадии возникновения дефекта и на стадии распространения трещины. Сравнение прогнозируемой и эксплуатационной траекторий роста трещины подтверждает

адекватность разработанной модели фазового поля для описания процесса разрушения в проушине диска турбины.

В Заключение сформулированы итоги выполненного исследования, представлены разработанные рекомендации, основные выводы диссертации, а также обсуждены перспективы дальнейшей разработки темы.

Научная новизна и теоретическая значимость работы заключается в следующем:

- экспериментально обоснован новый метод прогнозирования долговечности на стадиях появления и развития дефектов на основе уравнений изотропного и кинематического упрочнения малоциклового усталости и фазовых полей разрушения с учетом функции повреждений;
- в рамках одной системы определяющих уравнений объединены закон накопления повреждений Lemaitre, модели изотропного и кинематического упрочнения Voce и Armstrong-Frederick соответственно, а метод фазовых полей разрушения позволил описать развитие образовавшихся трещин на различных масштабных уровнях;
- разработан новый метод моделирования доминирующих механизмов разрушения, накопления и развития повреждений в материале зернистой структуры по моделям фазовых полей разрушения на основе мозаики Вороного;
- осуществлена численная реализация решения общей системы разрешающих уравнений малоциклового усталости, вязкопластичности и повреждений в вычислительном МКЭ комплексе ANSYS и расчетно-экспериментальном методе определения управляющих параметров данных уравнений, инвариантных к характеру поведения сплошной среды;
- произведен анализ эффектов смешанных форм деформирования и двухосности нагружения при моделировании развития сквозных и поверхностных дефектов для плоских и трехмерных задач в терминах фазовых полей разрушения при монотонном и циклическом деформировании.

Практическая значимость полученных результатов состоит в обосновании оценки несущей способности и долговечности элементов конструкций на основе современных моделей механики сплошной среды. Возможность практического приложения результатов проведенных исследований показана на примере расчетов остаточной долговечности элемента диска паровой турбины с эксплуатационным повреждением. Разработанные и реализованные в вычислительном комплексе новые алгоритмы расчетов и анализа процессов разрушения материалов пригодны для широкого использования и способствуют повышению качества прогнозирования и оптимизации долговечности элементов конструкций.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации не вызывают сомнений, поскольку они подтверждаются установленным соответствием частных численных и аналитических решений с известными литературными данными других авторов, корректностью математических формулировок, валидацией и верификацией вычислительных моделей по отношению к экспериментальным исследованиям, выполненным в рамках настоящей работы.

Основные результаты диссертации отражены в 13 публикациях в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов диссертаций, и журналах, индексируемых в системах цитирования Web of Science и Scopus. Результаты

диссертационного исследования были доложены на международных и всероссийских конференциях, а также на научных семинарах. Автореферат соответствует содержанию диссертации и позволяет составить достаточно полное представление о ней.

В целом диссертация оставляет очень благоприятное впечатление, так как в ней получено значительное количество интересных научно-методических результатов, проведен большой объем теоретической, вычислительной и экспериментальной работы, которая позволила не только получить новые интересные результаты, но и грамотно сформулировать перспективные пути их дальнейшего развития.

По тексту диссертации имеются следующие **вопросы, замечания и комментарии.**

1. В тексте диссертации, в отличие от автореферата, отсутствует подраздел, в котором представлена информация о связи выполненных исследований с тематикой НИР организации, где выполнялась работа, и поддержкой грантов научных фондов.
2. Отсутствует информация о том, была ли проведена предварительная термическая обработка материалов образцов, которые были использованы при проведении экспериментов.
3. В используемой автором модели поврежденности скорость ее накопления определяется уравнениями (2.1.7) – (2.1.9). Однако известно, что предельная скорость накопления поврежденности при деформации зависят не только от показателя трехосности напряженного состояния, как это следует из (2.1.8), но и от вида напряженного состояния, которое принято характеризовать показателем Лоде или углом Лоде (см. работы В.Л. Колмогорова, А.А. Богатова, 1976; Y. Bai, T. Wierzbicki (2008); А.В. Туманова (2023)).
4. В разделе «Определение констант закона накопления повреждений Lemaitre» при обработке результатов экспериментов по статическому растяжению указано, что фактически разрушение происходит не при значении поврежденности $\omega = 1$, а при $0.2 \leq \omega_c \leq 0.5$. На наш взгляд это связано с тем, что было принято допущение об отсутствии накопления поврежденности на стадии равномерной деформации до предела прочности, хотя модель Lemaitre этого не предполагает. Тем более некорректно рассчитывать критическую поврежденность по формуле (2.4.4), так как в соответствии с ней $\omega_c = 1$ может быть достигнуто только, если истинное напряжение разрушения $\sigma_{разр} = 0$, то есть, когда диаграмма «деформация - усилие растяжения» ниспадает до 0. Действительно, такую диаграмму получить можно при условии использования очень жесткой испытательной машины или специальных методик, обеспечивающих построение ниспадающих диаграмм на закритической стадии деформирования (см. работы В.Э. Вильдемана, В.В. Стружанова). В экспериментах, которые проводил автор диссертации, эти условия, видимо, выполнены не были, поэтому формально и было получено, что $\omega_c < 1$.
5. Из формулы (3.1.6) неясно какую размерность имеет функция γ плотности энергии поверхностных сил.
6. Известно, что критическая скорость высвобождения энергии G_c зависит от вида напряженного состояния, поэтому величины G_{cl} , G_{cII} , G_{cIII} при разных модах нагружения могут иметь существенно разные значения. Может ли это быть учтено в предлагаемой модели фазового поля?
7. При моделировании усталостного нагружения стали 34ХНЗМА на стр. 125 не приведено обоснование выбора критического (правильней, наверное, писать допустимого) значения параметра поврежденности $\omega \approx 0.8$. Кроме того, эксплуатация турбины осуществляется при температуре до 550°C , а испытания всех свойств были

проведены при комнатной температуре, поэтому полученные результаты по прогнозированию долговечности следует рассматривать как «верхнюю оценку».

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне, содержит новые результаты и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК России к диссертациям на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела, а её автор, Косов Дмитрий Александрович, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук.

Результаты диссертации были доложены 28 августа 2025 года на научном семинаре лаборатории микромеханики материалов федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук" и получили положительные отзывы специалистов.

Зав. лабораторией микромеханики материалов,

д.т.н., член-корреспондент РАН

Смирнов Сергей Витальевич



/ С.В. Смирнов/

03.09.2025 г.

620049 Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

Тел. +7 (912) 631-11-26

E-mail: svb@imach.uran.ru