

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

На диссертацию Заболотского Андрея Васильевича «Многоуровневый подход к прогнозу трещинообразования в квазихрупких композиционных материалах в условиях градиента температуры», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела.

Современное производство предполагает широкое применение композиционных материалов обладающих требуемым набором свойств. В условиях высоких термических нагрузок, например в литейной промышленности, используют специальные композиты, разрушение которых имеет квазихрупкий характер. Их поведение под нагрузкой обусловлено микроструктурой с наличием множества границ между армирующими элементами и матрицей, которые могут служить преградой на пути распространения трещины. При высоких температурах имеют место температурные зависимости упругих и прочностных характеристик как отдельных фаз, так и композиции в целом. Повышение ресурса используемых материалов, а также оценка надежности конструкций при проектировании требует понимания протекающих процессов. Для этого необходимы теоретические модели и подходы, учитывающих температурные градиенты при прогнозировании разрушения, позволяющие осуществить расчеты напряженного-деформированного состояния и получить оценки степени разрушения в ходе эксплуатации конструкций. Это определяет **актуальность исследования** представленной диссертации.

Автор предложил метод, основанный на последовательном уменьшении расчетного объёма при моделировании развития трещин, путём уточнения локализации поврежденных участков и параллельном детализировании структуры материала. Такой подход позволяет эффективно прогнозировать эксплуатационный ресурс конструкций и диагностировать причины их отказов. Существенным преимуществом метода является возможность получения результатов без необходимости воссоздания полной геометрии всей конструкции, что делает его особенно ценным для инженерной практики.

Применение предложенной методологии может облегчить решение задач, связанных с проектировкой, оценкой надёжности и анализом повреждаемости огнеупорных и других термостойких конструкционных элементов, что определяет **практическую ценность работы**.

Структура работы включает введение, пять глав, заключение и Приложения. Общий объём текста — 301 страница, библиография насчитывает 415 источников.

Во Введении сформулированы: цели и задачи исследования, обоснована актуальность и научная новизна темы, описаны используемые методы, указаны теоретическое и практическое значение полученных результатов, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена анализу литературы. В ней рассмотрено развитие теорий разрушения композиционных материалов. Важным выводом автора является то, что прямое моделирование процессов разрушения с учётом структурных особенностей материалов на современном уровне развития вычислительных мощностей невозможно. В качестве альтернативы предлагается многоуровневая методика, базирующаяся на оригинальном выборе масштаба рассматриваемой области и уточнении структуры материала в зонах концентрации напряжений. В главе детально освещены механизмы поэтапного разрушения, влияние структуры на напряжённое состояние, особенности локализации зарождающихся трещин, энергетика их роста и выделение тепла в процессе разрушения.

Необходимо отметить, хороший уровень обзорной части работы, где рассмотрены основные подходы механики разрушения и физическая природа процессов приводящих к разрушению, что говорит о понимании исследуемых вопросов.

Во 2-й главе представлены основные уравнения, описывающие физико-механические свойства ККМ, а также две разработанные автором модели: модель материала и модель разрушения. Модель описания разрушения предполагает применение градиентного деформационного критерия, позволяющего идентифицировать область зарождения трещины и получить оценки возможного направления ее распространения и величины приращения. Валидация критерия выполнена с использованием экспериментов на блоках пресноводного льда. На первый взгляд данный материал кажется не подходящим объектом для сопоставления, однако учитывая быстрый локальный нагрев, приводящий к появлению термических напряжений и образованию трещин, данные опыты могут быть признаны адекватными.

В конце главы сформулированы выводы.

Глава 3 посвящена анализу модели материала. Описывается реалистичная внутренняя структура ККМ, проведены расчёты взаимного влияния включений и пор. Рассмотрены понятия «дальнего» и «близкого» взаимного расположения концентраторов напряжений, численно исследовано влияние расстояния между концентраторами напряжений микроструктурного размерного уровня на напряжённое состояние и трещинообразование в их окрестности. Описан алгоритм построения геометрии дефектов посредством распределения частиц, приближенного к их реальной структуре. Для анализа структуры применяется оригинальная методика на основе подхода Монте-Карло. Также предложена экспериментальная методика определения температурного диапазона, в котором допустимо использование модели, на основе испытаний по ГОСТ 4070-2000.

В главе приведены данные о зависимости упругих свойств от температуры, а также экспериментальные способы определения параметров материала.

Представлены результаты численных расчетов деформации в образцах при различных комбинациях внешней нагрузки, формы пор и твердых включений,

рассмотрено влияние расстояния между включениями, на направление роста трещин и расположение области трещинообразования.

По результатам исследований сделан ряд выводов, включая вывод о возможности проведения численных расчетов влияния структурных элементов на разрушение с использованием моделирования структуры материала по данным об использованных сырьевых компонентах.

В Главе 4 рассмотрена модель разрушения, построенная для описания процесса, до утраты конструкционной целостности или достижения критической длины трещины. Показаны особенности проявления квазихрупких свойств материала.

Предложенная модель проверена с использованием экспериментов: трёхточечный изгиб и динамических испытаний по методу Кольского. Дополнительно рассмотрено поведение трещин на границах, разделяющих фазы с различными упругими свойствами. Рассмотрено влияние скорости деформации на характер разрушения, включая процессы высокоскоростного, по сути ударного нагружения. Проведены исследование НДС для вокруг трещиноподобных дефектов вблизи границы раздела матрицы и армирующего включения, а также в случае высокотемпературного градиента.

Основной вывод главы касается разработанной модели разрушения ККМ путем трещинообразования для прогнозирования ресурса эксплуатации конструкций, учитывающей влияние структуры материала и температурной зависимости его упругих свойств.

Глава 5 посвящена применению предложенного метода на примерах объектов, подвергающихся циклическим термическим и механическим нагрузкам — от футеровки теплового оборудования до чугуновых пресс-форм для производства огнеупорных изделий. Приведены конкретные примеры прогнозирования траектории разрушения футеровки и срока службы форм. Полученные результаты подтвердили применимость модели к реальным инженерным условиям.

Основной вывод главы совпадает с защищаемым положением. Он касается предложенного способа решения задач прогнозирования направления распространения трещин в конструкциях из ККМ с помощью многоуровневого моделирования НДС.

В Заключении сформулированы основные выводы и практические рекомендации. Среди важнейших результатов, полученных в диссертации, следует отметить:

1. Предложенный многоуровневый подход для прогноза стойкости квазихрупких композиционных материалов под действием механических и термомеханических нагрузок с учетом температурной зависимости свойств при значительных градиентах температуры.
2. Алгоритм построения геометрической структуры ККМ с многочисленными термодинамическими фазами и границами их раздела на основании данных о

зерновом составе шихты и условий его термообработки, а также с учетом зависимости свойств от температуры для создания простой инженерной модели и проведения расчетов процессов разрушения.

3. Способ оценки температурного диапазона, в рамках которого наблюдается переход от хрупкого поведения материала к пластичному. Методика основана на стандартных лабораторных процедурах (ГОСТ и ISO) и пригодна для промышленных применений.
4. Результаты исследования закономерности роста трещин при разных условиях и скоростях нагружения в гетерофазных материалах при наличии градиентного температурного поля, а также расположении трещины вблизи границ раздела.

В Приложениях представлены документы, подтверждающие внедрение результатов исследования на производственных объектах и в инженерных расчётах ряда предприятий.

Работа содержит ряд положений, формирующих **научную новизну**:

1. Способ оценки направления и прироста трещин в материалах путём анализа статических напряжений с применением градиентного критерия, что ранее не использовалось в подобных задачах.
2. Новая методика выявления температурных зон с различным характером деформирования огнеупорных материалов, основанная на широко применяемых стандартных процедурах.
3. Автоматизированный способ расчёта и моделирования распределения концентраторов напряжений в матрице ККМ с учётом реального зернового состава и условий термообработки материала.
4. Вариант многоуровневого подхода прогнозирования ресурса ККМ под действием механических и термомеханических нагрузок.

Результаты работы подтверждены как экспериментально, так и с использованием известных программных решений, что обуславливает их **достоверность и обоснованность**. Опубликовано 36 научных трудов, включая 7 работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 11 — в зарубежных рецензируемых журналах, входящих в Scopus и Web of Science.

Название диссертации **соответствует** содержанию и заявленной научной специальности 1.1.8 – механика деформируемого твёрдого тела. Представленный **автореферат** точно отражает содержание, основные положения и выводы исследования.

Основные замечания по работе:

1. Диссертация содержит множество терминологических неточностей, например:
 - Использование понятия *явный – неявный расчет и метод*. В отношении учета или не учета внутренней структуры, корректнее

говорить о явном или неявном учете. В отношении отсутствия связности решения тепломеханической задачи это не корректно. Принято говорить о не связной постановке или решении задачи, или о не сопряженной задаче. В данном исследовании была выполнена частичная или односторонняя связность.

- Вместо термина *скорость звука*, корректнее использовать скорость распространения упругих волн. Кроме того два типа волн со своими скоростями не корректно называть *компонентами*.
- Вместо *компонентов* НДС должно быть компонент НДС.
- Неверное использование понятия «*конечной деформации*»
- В расшифровке обозначений указано *теплопроводность*, вместо коэффициента теплопроводности.
- Условие *непересечения* в описании постановки задачи. Предполагалось условие жесткой стенки без трения или зеркального отражения (стр.93 и 94, рис 10а). Заметим, что такой вид граничных условий обычно изображается иначе.

2. Некоторые некорректности записи математических соотношений предложенного градиентного деформационного критерия, а также нюансы его применения. Анализ текста и полученных результатов показал, что, по сути, используется не градиент, а его конечный аналог на достаточно большом масштабе.
3. Автор упростил соотношение Дюамеля-Неймана – формула (2) автореферата и формулы (31) и (43) в диссертации, мотивировав это тем, что погрешность вычисления в этом случае для хрупких фаз не превысит 5%. При этом из выражения были исключены члены, определяющие упругое изменение объема материала при нагружении. Такое упрощение вызывает вопросы о его корректности для рассмотрения исследуемых процессов.

Детальное изучение текста диссертации позволило понять, что сокращенное соотношение, было использовано лишь для оценок приращения трещины на заключительном этапе расчетов, что в значительной степени нивелирует возможные неточности. Расчет напряженно-деформированного состояния осуществлялся в рамках уравнения термоупругости Дюамеля-Неймана с помощью пакета программ численного моделирования.

4. Недостаточно подробно в тексте и в подрисуночных подписях описаны представленные изображения. То же самое относится и к описанию условий нагружения при решении задач.

Тем не менее, указанные замечания не ставят под сомнение научную значимость и практическую ценность диссертационного исследования.

Считаю, что диссертация «Многоуровневый подход к прогнозу трещинообразования в квазихрупких композиционных материалах в условиях градиента температуры» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Они имеют существенное значение для применения и развития методов и подходов моделирования, а также прогноза разрушения квазихрупких композиционных материалов в условиях механических и термомеханических нагрузок. Диссертация соответствует требованиям п.п. 9 – 11, 13, 15 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор Заболотский Андрей Васильевич достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент:



Доктор физико-математических наук
По специальности 01.02.04 –
«Механика деформируемого твердого тела»
ведущий научный сотрудник
Лаборатории глубинных геофизических
исследований и региональной сейсмичности
ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и
геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН
профессор РАН
Стефанов Юрий Павлович

20.01.2026

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, , пр-т Академика Коптюга, д.3
Телефон: + 7 (383) 333-29-00
E-mail: yu_st@mail.ru