

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям

НИТУ МИСИС

д.т.н., проф.

М.Р. Филопов

2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу 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.

Актуальность работы

Композиционные материалы часто демонстрируют сложный характер поведения под механической или термомеханической нагрузкой, что объясняется наличием множества границ раздела фаз в материале, которые позволяют смещаться отдельным областям материала относительно друг друга при нагружении без разрушения конструкции как целого. Примерами таких материалов могут быть керамические и огнеупорные материалы, бетоны, литейные чугуны и т. п. Огнеупоры или высокотемпературные материалы являются основным типом композитов, применяемых при высоких температурах.

Такие условия применения материалов требуют учета того, что в конструкции может возникать значительный температурный градиент, а это в свою очередь приводит к термомеханическим напряжениям внутри материала из-за неравномерного температурного расширения и сложного взаимодействия с соседними деталями и элементами конструкции. Значительные температурные градиенты могут вызывать заметные различия в упругопластических реакциях материала на разных температурных участках, вплоть до проявления различного характера разрушения в зависимости от зоны футеровки.

Прогнозирование срока службы материалов в условиях термомеханического воздействия является важной технической задачей. Актуальность прогнозирования возрастает за счёт постоянного изменения параметров производственных процессов

(например, ассортимента выплавляемых сталей в черной металлургии), а кроме того меняется сырьевая база для производства огнеупорных материалов и предпринимаются попытки их совершенствования. Вследствие этого задача, поставленная в представленной диссертации, имеет практическое значение по применению мультидисциплинарных многоуровневых подходов к описанию процесса разрушения огнеупоров на доступном инженерному составу уровне.

Целью работы явилась разработка многоуровневого подхода к численному моделированию разрушения, учитывающему особенности структуры и свойств материалов при условиях высокотемпературной эксплуатации и градиента температурного поля для анализа причин разрушения конструкций и прогнозирования их ресурса.

Поставленные для достижения данной цели задачи соискатель решает последовательно и грамотно. Он разрабатывает модель структуры огнеупорного материала и модель его разрушения, предполагающую, что пластические особенности разрушения материала как целого объясняются различными эффектами на границах раздела фаз в материале, в то время как сами фазы являются хрупкими. Данный подход позволяет упростить анализ трещинообразования на структурном уровне и оценить среднюю скорость роста микротрещин под действием внешних сил. Обосновывается экспериментальный подход к определению области применимости предложенных моделей. Развитие этой модели разрушения, позволяет автору выявлять зоны повышенной нагрузки в конструкциях, оценивать длину траектории микротрещин и время их роста до критического размера и экстраполировать полученные результаты на конструкцию в целом для оценки ее ресурса.

Личный вклад автора заключается в постановке цели исследования, разработке плана работ, выполнении необходимых расчетов, разработке методики экспериментов и непосредственное участие в экспериментальной работе. Выводы по работе сформулированы автором лично, автор принимал решающее участие в написании статей по теме работы.

Основное содержание диссертации, ее основных выводов и результатов.

Диссертационная работа состоит из введения, литературного обзора, пяти глав, заключения, списка использованных источников и 6 приложений. Работа изложена на 31 странице, включая 91 рисунок, 12 таблиц.

По результатам рассмотрения предоставленной диссертации, автореферата, а также основных публикаций по теме диссертационного исследования определено следующее.

Во введении приведена актуальность исследования, его научная новизна и практическая значимость, даны необходимые определения. Сформулирована цель работы и способ ее достижения.

В первой главе приведен анализ литературных отечественных и зарубежных систематических источников, посвященных процессам квазихрупкого разрушения различных материалов. Обосновывается применение многоуровневого подхода к анализу разрушения огнеупорных футеровок, как способа, позволяющего создать простую и интуитивно понятную модель трещинообразования.

Во второй главе выполнена математическая постановка задачи, введена модель разрушения квазихрупкого композиционного материала. Обосновывается упрощение соотношения Дюамеля-Неймана для структурных составляющих огнеупорных материалов за счет их выраженных хрупких свойств – типичные низкие значения коэффициента Пуассона для компонентов огнеупорных материалов позволяют исключить из соотношения члены, описывающие упругое изменение объема материала при механическом (термомеханическом) нагружении. Разрабатывается методика локального определения направления роста трещины с помощью введенного автором градиентного деформационного критерия, предполагающего развитие трещин из зон локально растяжения в направлении зон локально сжатия (либо минимального растяжения). Описана экспериментальная проверка методики на примере роста термических трещин в блоках пресноводного льда при низких температурах и в окрестности температуры плавления.

В заключительной части главы приводится алгоритм применения введенной модели к анализу разрушения огнеупорных футеровок как промышленных конструкций.

В третьей главе рассматривается применение модели квазихрупкого композиционного материала к огнеупорам. Рассматривается вопрос моделирования структуры материала на основе данных о составе шихты для его синтеза и условий термической обработки. Обосновывается способ экспериментального определения границ интервала температуры, в котором может быть применена предложенная модель разрушения материала по результатам стандартного испытания огнеупора на определение температуры начала деформации под нагрузкой по ГОСТ 4070-2000, которое может быть проведено в рамках входного или выходного контроля качества огнеупорной продукции. Кроме того, изучается формирование суперпозиции полей напряжений и упругих деформаций в окрестности системы микроструктурных концентраторов напряжений и их влияния на особенности формирования трещины, в частности, длину ее траектории. Таким образом, разрабатывается вычислительный инструмент, позволяющий на основе

данных о гранулометрическом составе шихты материала, параметрах его термической обработки и результатов стандартных лабораторных испытаний выполнить расчет ожидаемой длины траектории микротрещины в материале. Совместное применение этой методики и многоуровневого подхода позволяет оценить время формирования трещин критического размера в огнеупорах при их эксплуатации и, соответственно, время появления видимых дефектов футеровки.

В четвертой главе представлены результаты исследований особенностей разрушения квазихрупких композиционных материалов с применением разработанной модели их последовательного разрушения. В основе предложенной модели лежит энергетический подход, в частности, постулируется, что образование новой поверхности при росте трещины происходит за счет энергии упругого деформирования материала в окрестности ее вершины. Скорость роста трещины определяется упругими характеристиками материала. Из этих положений автор делает заключение о том, что скорость «разгрузки» напряженно-деформированного состояния при трещинообразовании конечна и зависит от его упругих свойств, соответственно, существует критическая величина скорости упругого деформирования, при которой происходит изменение характера разрушения. Предлагается способ вычисления этой скорости. Экспериментально в работе показано, что действительно, при переходе через критическую величину скорости деформирования характер разрушения материала изменяется с образования единичных трещин на объемное разрушение.

Также в главе анализируются особенности роста трещин на границах раздела фаз с различными упругими характеристиками: на границах зерен и матрицы огнеупора и в случае переменных упругих характеристик материала при наличии температурного градиента. Полученные теоретические расчетные результаты валидируются в экспериментах с термическим нагружением блоков пресноводного льда.

Пятая глава посвящена обзору практических применений полученных результатов. В частности, рассмотрен процесс разрушения изделий рабочей футеровки сталеразливочных ковшей в зависимости от особенностей их установки. На примере данного оборудования продемонстрирован многоуровневый подход к моделированию трещинообразования в конструкциях: определены зоны предполагаемого разрушения, рассчитаны преимущественные направления роста трещин в отдельных изделиях и выполнена оценка средней скорости их роста. Рассмотрен рост трещин в огнеупорных изделиях при испытаниях на термостойкость и рост усталостных трещин в прессовой оснастке для производства огнеупоров сложной геометрической формы. Приведен пример применения многоуровневого подхода для анализа аварийной ситуации: взрывного

разрушения бетонного изделия — брызгозащитного экрана установки вакуумной обработки стали (VD-VOD) при сушке. На примере изделий для футеровки мартеновской печи с использованием градиентного деформационного критерия показано влияние скорости разогрева футеровки на образование сколов рабочей грани огнеупоров.

В заключении представлены основные выводы и результаты диссертационного исследования, которые полностью отражают полученные результаты и подчеркивают их значимость.

Работа оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к докторским диссертациям. Автореферат полностью отражает основные положения диссертационной работы, содержание которой соответствует паспорту специальности 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела (МДТТ) в пунктах 1, 4, 10, 11, 13.

Основные научные результаты работы изложены в 36 публикациях, в том числе в 7 статьях в российских научных изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ, 12 статьях в изданиях, входящих в международные реферативные базы и системы цитирования.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов обусловлена тем, что разработанные модели структуры и разрушения материалов позволяют объяснить наблюдаемые эффекты при термическом и динамическом нагружении образцов и конструкций. Предложенный подход к прогнозу ресурса конструкций на основе принятых допущений позволяет предсказывать динамику разрушения на основе анализа статических картин напряженно-деформированного состояния, что значительно сокращает объем необходимых вычислений.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

Разработан оригинальный многоуровневый подход к прогнозированию срока службы квазихрупкого композиционного материала при трещинообразовании под воздействием механических и термомеханических нагрузок.

Определены температурные границы интервалов хрупкого разрушения и пластической деформации огнеупорных изделий на основе данных стандартных лабораторных испытаний.

Сформулирован градиентный деформационный критерий разрушения для композиционного материала, позволяющий путем анализа статических или квазистатических полей упругих деформаций одновременно фиксировать момент начала роста трещины, ее локализацию, направление распространения и приращение размера.

Разработана модель материала, позволяющая определять геометрические параметры концентраторов напряжений в однородной матрице по зерновому составу

шихты материала и условиям его термообработки.

Предложена модель разрушения, которая численно исследует динамику роста трещин в квазихрупком огнеупорном материале и объясняет влияние скорости приложения нагрузки на характер разрушения.

Выполнено численное моделирование полей напряжений и деформаций в окрестности вершины трещины у границы раздела фаз для прогнозирования дальнейшего роста.

Практическая значимость.

Полученные в диссертационной работе результаты обладают высоким потенциалом практического применения в науке и технике. В особенности необходимо отметить основные аспекты практической значимости.

Использование предложенного подхода обеспечивает возможность анализа проектных решений путем моделирование механического разрушения материалов в заданном поле внешних воздействий.

При разработке новых материалов или выборе их для изменившихся условий эксплуатации предложенный подход позволяет уточнить требования к свойствам на этапе подготовки технического задания на основе анализа поведения их структурной модели в заданных условиях.

Проявление материалами хрупких свойств на уровне структуры и ограниченной пластичности на макроуровне позволяет с помощью предложенного многоуровневого подхода прогнозировать динамику разрушения конструкций по результатам статических и квазистатических расчетов полей напряжений и деформаций.

Достоверность основных выводов и положений по диссертации подтверждается применением корректных методов и методик испытаний и использованием современного оборудования для изучения свойств экспериментальных образцов, применением современных математических методов компьютерного моделирования.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов. Полученные в ходе выполнения исследования результаты показали, что разработанный подход к прогнозу ресурса огнеупорных материалов в службе позволяет оценивать трещинообразование при эксплуатации материалов, не прибегая к длительным и ресурсозатратным промышленным испытаниями материалов. Таким образом представленная работа может быть интересна инженерному составу организаций, производящих огнеупоры (ООО «Группа «Мagneзит», ОАО «Боровичский комбинат огнеупоров», Первоуральский динасовый завод и т.д.), а также потребителей огнеупоров –

предприятий черной, цветной металлургии и производителям стекла и цемента (ПАО «Северсталь», ПАО Магнитогорский металлургический комбинат и др.).

Замечания по диссертационной работе

1. В качестве модельного объекта при исследовании трещинообразования в хрупких материалах используются блоки пресноводного льда, как материала, проявляющего сходный характер изменения упругих характеристик по сравнению с огнеупорными материалами. При этом недостаточно освещается вопрос влияния зерновой фракции огнеупора на различия в высокотемпературном поведении льда и композита.
2. По тексту диссертации и автореферата встречаются мелкие опечатки и неточности, например, на рисунке 17 стр. 111 количество значащих цифр в легенде указано по умолчанию примененного расчетного комплекса и значительно превышает необходимое количество.
3. Вызывает сомнение наличие температурной зависимости размера частиц от радиуса кривизны в указанных диапазонах размеров, которая должна наблюдаться только при размерах частиц менее 50 нм.

Указанные недостатки не являются принципиальными и не снижают общего положительного впечатления от диссертации и ее научной значимости, и работа заслуживает высокой оценки.

Заключение

Диссертационное исследование представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные решения и предложены новые подходы к определению напряженно-деформированного состояния конструкций из огнеупорных (квасихрупких композиционных) материалов и прогнозирования их ресурса. Оригинальная модель разрушения, сводящая проявления пластичных свойств этим классом материалов как при высокой температуре, так и при высокой скорости приложения нагрузки, к поверхностным эффектам на границе раздела элементов структуры композита позволяет применять модели разрушения хрупкого тела. Это позволяет сокращать объем вычислений при определении напряженно-деформированного состояния конструкции, а также использовать квазистатические поля деформации для прогнозирования трещинообразования.

Диссертационная работа Заболотского Андрея Васильевича на тему: «Многоуровневый подход к прогнозу трещинообразования в квазихрупких композиционных материалах в условиях градиента температуры» по актуальности

тематики, объему полученного экспериментального материала, его новизне, научной и практической значимости соответствует критериям п. 9-14 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Заболотский Андрей Васильевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС «29» октября 2025 года. (Протокол № 3 от «29» октября 2025 года)

Заведующий кафедрой функциональных
наносистем и высокотемпературных материалов
НИТУ МИСИС
к.т.н., доцент



Д.В. Кузнецов

Адрес: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д.4, стр.1

Тел.: +7 (495) 236-84-18. E-mail: dk@misis.ru

Подпись заведующего кафедрой функциональных
наносистем и высокотемпературных материалов
НИТУ МИСИС

к.т.н., доцента Д.В. Кузнецова

ЗАВЕРЯЮ

Зам. нач-ка отдела
Кадров



КУЗНЕЦОВА А.Е.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Адрес: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д.4, стр.1 Тел.: +7 (495) 236-84-18.

E-mail: dk@misis.ru веб-сайт: <https://misis.ru>

