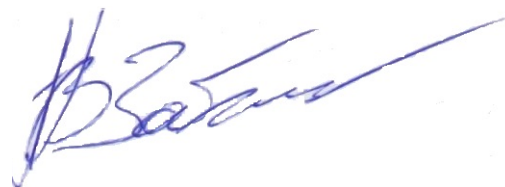


На правах рукописи



ЗАБОЛОТСКИЙ АНДРЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

**МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗУ
ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В КВАЗИХРУПКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛАХ В УСЛОВИЯХ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ**

1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью «Группа «Магнезит»; Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Научный консультант:

Дмитриев Андрей Иванович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Стефанов Юрий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Темлянецов Михаил Викторович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный индустриальный университет", проректор по реализации стратегического проекта

Юрков Андрей Львович, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», кафедра керамики и огнеупоров, профессор

Ведущая организация:

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

Защита диссертации состоится 9 февраля 2026 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.055.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 15. Тел.: (383)333-21-66, факс: (383)333-16-12, e-mail: igil@hydro.nsc.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте <https://www.hydro.nsc.ru> Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН.

Автореферат разослан «18» ноября 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.1.055.02 к. ф.-м. н.



Бойко Светлана Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Квазихрупкими композиционными материалами (ККМ) называют многокомпонентные гетерофазные материалы, в которых, несмотря на хрупкое поведение составляющих индивидуальных фаз, на диаграмме деформирования присутствует зона пластических деформаций. Данное свойство является следствием наличия множественных границ раздела фаз в материале, которые обеспечивают перемещение отдельных областей материала относительно друг друга при разрушении. Примерами ККМ служат керамические и огнеупорные материалы, бетоны, литейные чугуны и т.п. Огнеупоры или высокотемпературные материалы являются основным видом ККМ, эксплуатируемых в условиях высоких температур.

Высокотемпературное применение материала подразумевает наличие такой особенности, как значительный градиент температуры в конструкции в случае одновременного соприкосновения с горячим рабочим телом (например, расплавом металла) и пассивным, либо активным охлаждением с противоположной стороны футеровки. Это способствует появлению градиентных термомеханических напряжений в материале за счет неравномерного температурного расширения или сложного механического взаимодействия с соседними изделиями и другими элементами конструкции. Термомеханические нагрузки в конечном итоге приводят к необратимым пластическим деформациям (ползучесть) или трещинообразованию.

Свойства огнеупоров и других ККМ, в том числе упругопластические имеют выраженную зависимость от температуры. Таким образом, значительные градиенты температуры могут приводить к существенным отличиям упругопластических реакций материала в различных температурных зонах. Например, в огнеупорных материалах окрестность рабочей (горячей) поверхности может проявлять пластические свойства, находясь вблизи температуры плавления в процессе эксплуатации, в то время как окрестность холодной поверхности проявляет выраженные хрупкие свойства.

Огнеупорные материалы по своей структуре представляют собой неоднородные композиции, состоящие из армирующих зерен различной формы и размера (иногда разной химической природы) – каркаса, распределенные в относительно однородной связующей матрице, образующейся в результате спекания мелких фракций зерен (исключение составляют огнеупорные бетоны и торкрет-массы, упрочнение которых происходит за счет химической реакции без нагрева). Матрица и зерна каркаса могут содержать также пустоты, представленные округлыми порами и вытянутыми микротрещинами, которые, как правило, значительно чаще встречаются в матрице. Поры в основном образуются на стадии формования (прессования) материала, а микротрещины – при его термической обработке. В такой структуре при внешнем механическом или термомеханическом воздействии формируется напряженно-деформированное состояние (НДС), определяемое наличием большого количества концентраторов напряжений по границам раздела элементов

структуры или фаз (интерфейсам). Ввиду пространственной близости, поля напряжений и деформаций от разных концентраторов перекрываются и разрушение материала часто происходит уже под действием суперпозиции этих полей.

Ресурс службы огнеупорного ККМ при трещинообразовании определяется стадией квазихрупкого роста трещины докритического размера: по ее окончании происходит быстрое образование магистральных трещин в изделии, приводящее к существенному ослаблению или разрушению всей конструкции. Критическим размером трещины следует считать такой размер, который при приложении типичной механической или термомеханической нагрузки к объекту приводит к катастрофическому росту трещины и разрушению объекта.

Прогнозирование ресурса службы материалов в условиях термомеханического воздействия является актуальной технической задачей, а для случая огнеупорных бетонов, прогнозирование их разрушения во время сушки и разогрева позволяет предупреждать аварийные ситуации и оптимизировать режим термообработки. Актуальность прогнозирования возрастает также в связи с тем, что, с одной стороны, постоянно происходит изменение параметров производственных процессов, например, изменение сортамента выплавляемых сталей в черной металлургии и т.п., влекущее за собой, в том числе, изменения температуры и длительности термообработки металла. С другой стороны, изменяется претерпевает сырьевая база для производства огнеупорных материалов, а также предпринимаются попытки их совершенствования. Прогнозирование, опирающееся на статистические данные предыдущего опыта, в данном случае может оказаться малоэффективным, ввиду того, что новые параметры сырья или условий эксплуатации зачастую не имеют предшествующих аналогов. Метод промышленного эксперимента является неэффективным по экономическим соображениям, поскольку, временные и финансовые расходы на его проведение довольно велики.

Разработанность темы исследования. Перспективным способом решения задачи прогнозирования ресурса службы огнеупорного материала является разработка подхода к компьютерному моделированию его разрушения в градиентных температурных полях с учетом температурной зависимости свойств материала и, при необходимости, внутреннего давления флюидов в закрытых полостях (С.Г. Псахье, Р.В. Гольштейн и другие проводили численные исследования данного явления, а У. Кингери и Д. Хассельман разработали ряд критериев термостойкости, позволяющих предсказывать разрушение материалов при термомеханической нагрузке). Разработка такого подхода подразумевает как построение геометрического образа структуры материала, так и описание стадий разрушения, и формулировку условий перехода между ними.

При моделировании разрушения материал может быть представлен либо в виде непрерывной континуальной среды, обладающей некоторыми усредненными интегральными характеристиками, либо его структура может быть задана в явном виде с индивидуальными свойствами отдельных фаз (обособленных областей пространства, обладающих определенными

индивидуальными физическими и химическими свойствами). Для решения задач моделирования промышленных конструкций или иных крупных объектов обычно применяется задание материала в виде непрерывной среды (такой подход широко использован в работах А. Гриффита, Г. Ирвина, Г.П. Черепанова, К.П. Андреева и других), а для исследования поведения материалов под различной нагрузкой – может использоваться явное задание структуры материала (I. Sabirov, D. André, P. Doumalin и другие), которое предполагает его представление в виде нескольких обособленных конденсированных и газообразных фаз (матрица, включения, обладающие различными упругими свойствами, и дефекты – поры и микротрещины). Однако, этот подход не позволяет моделировать процессы разрушения на размерном уровне промышленного агрегата или изделия. Использование только интегральных характеристик материалов без учета их температурных зависимостей и их деградации по мере разрушения ограничивает возможность расчета фактического состояния материалов в градиентных температурных полях и прогнозирование их ресурса (R. Hetransky, А.Г. Ланин и другие). Эффективным решением поставленной задачи может быть использование многоуровневого подхода, сочетающего применение методик явного и неявного описания структуры материалов для различных размерных уровней.

Комплексный характер разрушения огнеупоров не позволяет в полной мере применять к прогнозированию их ресурса модели разрушения для непрерывных сред, основанные на превышении критического значения некоторыми характеристиками НДС (максимальные главные напряжения, максимальные допустимые деформации, критические коэффициенты интенсивности напряжений и т.д.), справедливые для хрупких материалов. Разрушение в таких материалах носит характер накопления повреждений, и прогноз должен учитывать величину, цикличность и динамику изменения действующей нагрузки. Кроме того, структурные элементы огнеупорных материалов могут выступать в качестве препятствий на пути растущих трещин, значительно замедляя скорость разрушения (В.В. Панасюк, Н. Kolsky, D.S. Dugdale, И.А. Овидько и другие). Геометрическая форма изделий также может служить сдерживающим фактором трещинообразования за счет остановки трещин на границах блоков или за счет создания условий всестороннего сжатия, в которых разрушение материала происходит при более высоком уровне нагрузки.

Необходимо отметить, что исследований разрушения высокотемпературных материалов при температуре эксплуатации проводилось значительно меньше, чем исследований разрушения строительной керамики или металлоконструкций при нормальных температурах. Например, в «Encyclopedia of Thermal Stresses» (*Энциклопедия термических напряжений*) 2013 года, содержащей 1310 статей, собственно материалам, применяемым при температуре свыше 1000 °С посвящено менее 30 работ, а из 60 статей опубликованных в Journal of Thermal Stress (*Журнал термического напряжения*) за 2022 год только 4 статьи были посвящены высокотемпературным процессам,

протекающим при температуре более 1000 °С. Модели разрушения материалов с градиентом распределения упругих свойств в температурных полях ранее не применялись для моделирования разрушения функциональных высокотемпературных (огнеупорных) материалов. Однако, неоднократно отмечался ряд явлений, описание которых невозможно без учета неоднородного распределения упругих свойств в материалах (R.D. Mindlin, С.П. Курдюмов и другие), в частности, особенности роста трещин при пересечении границ фаз или областей с различными упругими свойствами.

Предложенный в диссертации многоуровневый подход, предполагает поэтапное двустороннее решение задачи («сверху-вниз» и «снизу-вверх»). Это достигается путем известного способа сокращения масштаба (от большего размера к меньшему – J.W. Hutchinson, A.G. Evans, S. Cai и другие) для детализации результатов: определение длины траектории трещины, характера разрушения отдельных конструктивных элементов футеровок и, на уровне микроструктуры материала – динамики развития трещины. При обратном масштабировании результатов исследования динамики роста трещин на моделях структуры материалов на более крупные размерные уровни – изделия и агрегат в целом, появляется возможность рассматривать процесс разрушения футеровки агрегата в динамике с целью прогнозирования срока ее эксплуатации. При этом в качестве исходных данных для прогнозирования используются результаты статических (или квазистатических) расчетов НДС для условий эксплуатации оборудования.

На первом этапе решения («сверху-вниз») для уровня агрегата определяются параметры НДС всей конструкции, с использованием интегральных свойств материалов и условий эксплуатации агрегата в качестве граничных условий. При этом выявляются наиболее упруго деформированные или напряженные зоны конструкции, опасные с точки зрения трещинообразования. Учитывается, что на уровне агрегата рассматриваемые конструкции представляют собой геометрические тела сложной формы, находящиеся в состоянии теплообмена с окружающей средой, что формирует соответствующие поля напряжений с концентраторами крупных размеров и, во многих случаях, их суперпозицию. Кроме того, учитывается градиент температуры и его влияние на вязкоупругие свойства материала. По специально разработанной методике обработки результатов лабораторных испытаний материалов в конструкции выделяются зоны, подверженные хрупкому разрушению, либо пластическим деформациям.

Для определения направления распространения трещин автором впервые был введен градиентный деформационный критерий, позволяющий прогнозировать момент возникновения и направление развития трещин на основании анализа статического поля деформаций и напряжений для заданного момента времени, основанный на предположении роста трещин из наиболее деформированных областей материала в направлении наименьших деформаций при превышении критического уровня деформирования. Введенный критерий может быть использован на всех размерных уровнях: на уровне агрегата он

позволяет определить общий усредненный вектор направления распространения трещин, расчетным путем определить область трещинообразования и длину траектории трещины на уровне изделия, а на уровне структуры материала – локальные направления, определяющие, в том числе, изломы траектории разрушения (отклонения от основного вектора, увеличивающие время сопротивления материала разрушению) под влиянием локальных концентраторов напряжений и суперпозиции их полей деформаций и напряжений. Достоинство критерия заключается в том, что он позволяет определять область начала роста и его направление для трещины по статически рассчитанным полям компонентов НДС материала за счет применения неявной схемы решения, что существенно сокращает объем предварительных расчетов. Зона начала трещинообразования может определяться как наиболее напряженная, так и наиболее деформированная область конструкции. Определение локального направления роста трещины с использованием статических или квазистатических полей деформированного состояния материала является отличительной особенностью введенного критерия. Для нахождения этой зоны могут также применяться и другие критерии прочности композиционных материалов (анализ критериев разрушения проведен в обзорах Е.И. Орешко и Л.В. Степановой на основе работ В.Д. Кулиева, Е.М. Морозова, Ю.Г. Матвиенко и других)

Под неявной схемой решения понимается, что в данном подходе используется независимый расчет температурного поля и полей напряжений и деформаций, т.е. решается несвязанная задача. Температурное поле рассчитывается в динамике, а результаты этого расчета используются в качестве граничных условий при решении статической задачи определения напряжений и деформаций для заданного момента времени.

Динамика роста трещин на уровне микроструктуры материала предполагает использование результатов, полученных на предшествующем этапе (более высоком размерном уровне), как исходных данных (граничных условий), а свойства и геометрическая форма элементов микроструктуры задаются в явном виде (до определенного размера, ниже которого материал считается однородным, что продиктовано ограничениями вычислительной мощности современных ЭВМ) с учетом влияния градиента температуры. В результате, появляется возможность оценить ресурс материала при заданных условиях эксплуатации и с учетом квазихрупкого (последовательного) характера роста трещины, в отличие от моделей разрушения непрерывных сред.

Второй этап построения прогноза («снизу-вверх») заключается в использовании результатов моделирования роста трещин на уровне структуры для оценки времени сопротивления конструкции при существующем уровне макронапряжений. При этом необходимо учитывать, как время, требуемое для достижения микротрещиной в наиболее напряженной области конструкции критического размера, так и разгрузку НДС за счет трещинообразования. Такая разгрузка приводит к изменению критических размеров трещины в соответствии с фактическим НДС и, соответственно, корректировке прогноза. Таким образом,

второй этап прогнозирования является итерационным и предполагает одновременный расчет приращения трещины и одновременного уточнения значения ее критического размера.

Целью настоящего исследования является разработка многоуровневого подхода к численному моделированию разрушения, учитывающему особенности свойств и структуры ККМ при условиях высокотемпературной эксплуатации и градиента температурного поля для анализа причин разрушения конструкций и прогнозирования их ресурса в условиях службы.

Задачи. В соответствии с целью работы были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка комплексного многоуровневого подхода к оценке ресурса конструкций, эксплуатируемых в условиях градиентного поля температуры.
2. Определение условий реализации хрупкого, либо пластического сценария разрушения области ККМ в зависимости от температурного поля в нем.
3. Разработка экспресс-метода оценки геометрических характеристик концентраторов напряжений в материале на основании данных о зерновом и фазовом составе шихты для его производства.
4. Формулировка критерия определения момента инициации и направления роста трещины по результатам расчетов статических полей напряжений и деформаций.
5. Определение пространственных областей взаимного влияния концентраторов механических напряжений в материале для разных размерных уровней и особенностей трещинообразования в этих областях.

Научная новизна. В работе получены следующие новые результаты:

1. Разработан оригинальный многоуровневый подход к прогнозированию ресурса ККМ при трещинообразовании под действием механических и термомеханических нагрузок с использованием статических (квазистатических) расчетов компонентов НДС, основанный на различиях в характере разрушения композиционного материала в целом и его индивидуальных составляющих. Разработанный подход позволяет свести задачу прогнозирования ресурса конструкций к выявлению области предполагаемого разрушения, определения НДС в ней и моделированию трещинообразования в представительном объеме материала под действием вычисленных нагрузок.
2. Впервые определены границы температурных интервалов хрупкого разрушения и пластической деформации для огнеупоров на основании результатов стандартных лабораторных испытаний (ГОСТ 4070-2000 – определение температуры начала деформации под нагрузкой). Для выявленных областей применяются различные модели разрушения материала.
3. Впервые сформулирован градиентный деформационный критерий разрушения для композиционного материала, позволяющий при помощи

анализа статических или квазистатических полей упругих деформаций одновременно фиксировать момент времени начала роста трещины в материале, ее локализацию, направление распространения и приращение размера за цикл приложения нагрузки.

4. Разработана модель ККМ, позволяющая определять в том числе геометрические параметры концентраторов напряжений в однородной матрице на основании зернового состава шихты материала и условий его термообработки. Модель учитывает зависимость свойств материала от температуры.
5. Предложена модель разрушения ККМ, позволяющая численно исследовать динамику роста трещин в квазихрупком огнеупорном материале и объясняющая влияние скорости приложения нагрузки на характер разрушения ККМ. Определены критические значения скорости нагружения, при которых меняется траектория роста трещин и характер разрушения.
6. Выполнено численное моделирование полей напряжений и деформаций в окрестности вершины трещины вблизи границы раздела фаз для прогнозирования ее дальнейшего роста.

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в том, что:

1. Особенности характера разрушения ККМ на разных размерных уровнях позволяют предложить упрощенную модель трещинообразования, пригодную для построения прогнозов разрушения материала и объяснения, проявляемых им квазихрупких свойств.
2. Предложенный способ анализа высокотемпературного поведения материалов при механическом воздействии позволяет определять границы применимости моделей хрупкого разрушения и пластических деформаций сред в градиентных температурных полях.
3. Введенный градиентный деформационный критерий для определения точки, момента времени начала трещинообразования, направления роста и приращения размера трещин при использовании его на разных размерных уровнях с соответствующими элементами структуры объясняет известный характер роста трещин в композиционных материалах.
4. Разработана модель роста трещины в ККМ на границе раздела фаз, которая позволяет объяснить известные факты о зависимости длины траектории трещины или преимущественно разрушающейся фазы (армирующих зерен или связующей матрицы) от условий и особенностей приложения внешней нагрузки.

Практическая значимость работы:

1. Использование предложенного подхода позволяет анализировать конструкторские решения путем моделирования механического разрушения материалов в известном поле внешних воздействий.

2. При проектировании новых материалов или их выборе для изменившихся условий эксплуатации, предложенный многоуровневый подход позволяет ограничить пространство решений на стадии подготовки технических заданий путем формулирования требований к материалам на основе анализа поведения их структурной модели в заданных условиях.
3. Проявление материалами хрупких свойств на уровне структуры позволяет при использовании предложенного многоуровневого подхода прогнозировать динамику разрушения конструкций по результатам анализа статических и квазистатических расчетов полей напряжений и деформаций.
4. Результаты работы были использованы при расследовании аварийных ситуаций на производстве, связанных с преждевременным выходом из строя частей оборудования, выполненных из ККМ: огнеупорных футеровок и конструктивных элементов, выполненных из чугуна.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе использованы следующие экспериментальные методы исследования: анализ гранулометрического состава порошков (ГОСТ ISO 13765-5-2017, ГОСТ 18318-94), анализ химического и фазового состава (ГОСТ 2642.0-2014, ГОСТ Р 55410-2013 (ИСО 12677:2011)), измерения предела прочности материалов при сжатии (ГОСТ 4071.1-2021), изгибе при повышенной температуре (ГОСТ Р 50526-93, ISO 5014-86), расклинивании, определение температуры начала деформации под нагрузкой (ГОСТ 4070-2000, ISO 1893-89), растровая электронная микроскопия и компьютерная томография материалов. Применено численное моделирование методами конечных и дискретных элементов.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертация по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует п. 1. «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых» п. 4. «Механика композиционных материалов и конструкций, механика интеллектуальных материалов», п. 10. «Прочность при сложных режимах нагружения. Теория накопления повреждений. Механика разрушения твёрдых тел.», п. 11 «Математическое моделирование поведения дискретных и континуальных деформируемых сред при механических, тепловых, электромагнитных, химических, гравитационных, радиационных и прочих воздействиях.» и п. 13 «Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях.» паспорта научной специальности 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела.

Положения, выносимые на защиту:

1. Градиентный деформационный критерий для определения точки и момента времени возникновения, направления роста и приращения размера трещин в ККМ за цикл нагрузки по данным квазистатических полей упругих деформаций (пункт 1 и 4 паспорта специальности).

2. Модель ККМ с системой микроструктурных концентраторов механических напряжений на основе данных о гранулометрическом составе его шихты и параметрах термообработки для оценки максимальных локальных напряжений в ККМ и исследования трещинообразования при тепловых и механических воздействиях, учитывающая зависимость свойств материала от температуры (пункт 10 и 11 паспорта специальности).
3. Способ определения областей в ККМ, подверженных хрупкому разрушению, либо пластическому деформированию в условиях градиента температур, по результатам стандартных лабораторных испытаний материалов по ГОСТ 4070-2014 и ГОСТ Р 50526-93 (пункт 13 паспорта специальности).
4. Модель разрушения ККМ путем трещинообразования для прогнозирования ресурса эксплуатации конструкций, одновременно учитывающая влияние структуры материала и температурной зависимости его упругих свойств на характер разрушения (пункт 10 и 11 паспорта специальности).
5. Многоуровневый подход к решению задач прогнозирования ресурса конструкций из ККМ при трещинообразовании по результатам квазистатических расчетов полей упругих деформаций, основанный на различиях в характере разрушения композиционного материала в целом и его индивидуальных составляющих (пункт 4 и 10 паспорта специальности).

Достоверность полученных результатов обеспечивается комплексным подходом к решению поставленных задач с использованием современных взаимодополняющих экспериментальных методов исследования на сертифицированном структурно-аналитическом и испытательном оборудовании; согласованием результатов, полученных различными методами; сопоставимостью их с данными других авторов; обобщением полученных результатов на основе современных представлений механики деформируемого твердого тела.

Апробация работы. Материалы диссертации ранее были представлены на следующих 36-ти конференциях: «Математические методы в технике и технологии» - 22 (2009), 23 (2010) и 24 (2011); 17th steelmaking conference, Buenos Aires, Argentina, 2009; Международная конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Алушта, 2010; «Международная конференция огнеупорщиков и металлургов», Москва, МИСиС – 2010 – 2025; RECENT ADVANCES in FLUID MECHANICS and HEAT & MASS TRANSFER – 2010, 2012, 2013, Западная Европа; AISTech 2011, Чикаго, США; Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: – 2011 (Москва), 2023 (Нижний Новгород); Ресурсосбережение в химической технологии, Санкт-Петербург, 2012; Минский международный форум по тепло- и массообмену: Институт тепло- массообмена имени А.В. Лыкова НАН Республики Беларусь, Минск – 2012, 2016, 2022; Научно-практическая конференция

"Совершенствование методологии познания в целях развития науки" Уфа, 2017; Международная конференция «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой». Томск, ИФПМ СО РАН – 2019 – 2024; Международная Конференция «Цифровизация промышленных тепловых процессов и агрегатов» - Группа «Магнезит», Сатка – 2020; XXVIII Всероссийская конференция по численным методам решения задач теории упругости и пластичности – СФУ, Красноярск 2023; Всероссийская Конференция по математике и механике – ТГУ, Томск, 2023; Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций (МРДМК) – 2023, Екатеринбург; Актуальные проблемы механики – Великий Новгород, 2024.

Публикации. Основное содержание работы изложено в 36 оригинальных статьях, из них 7 статей в журналах, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссией Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (в том числе: 4 – по специальности механика деформируемого твердого тела – 1.1.8, отнесенных к категориям К-1 или К-2 из Перечня рецензируемых научных изданий, 3 – в научных изданиях, индексируемых базой данных RSCI), а также 12 статей в научных изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора. Все результаты работы получены автором лично или в рамках коллективной работы при его активном участии. Планирование и разработку методики экспериментальных исследований и вычислительных экспериментов автор выполнил самостоятельно. Основные положения и выводы сформулированы автором лично.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет **301** страницу, включая **91** рисунок, **12** таблиц, **85** уравнений, список литературы из **415** наименований и **6** приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описаны цели и задачи работы. Обоснована актуальность темы и ее проработанность к настоящему моменту. Обсуждается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту и методика проведения исследования. Вводится понятие квазихрупкого композиционного материала (ККМ), как наиболее полно определяющего объект исследования – композиционные материалы, предназначенные для эксплуатации в условиях высокой температуры и ее градиента. Определен личный вклад автора, и описана апробация работы. Даны необходимые определения понятий, используемых в последующих разделах диссертации.

В первой главе излагается краткая история вопроса изучения разрушения ККМ, происходящего путем последовательного накопления повреждений, описывается современное состояние проблемы и представления о стадийности процесса разрушения. Обосновывается тезис о том, что ККМ, вследствие

особенностей структуры при условии высокотемпературной эксплуатации, в градиентных полях температуры демонстрируют особый механизм разрушения, требующий развития специфического подхода к прочностным расчетам при высокой температуре. В частности, при температуре эксплуатации в материале могут возникать области образования жидкой фазы, обеспечивающей пластические деформации материала в некотором диапазоне скорости приложения нагрузки. Кроме того, неоднородная структура материала приводит к появлению квазихрупких эффектов (в том числе при нормальных температурных условиях), препятствующих росту трещины по хрупкому сценарию и существенно продлевающих сроки эксплуатации таких конструкций. Показано, что использование интегральных характеристик материалов и выполнение прочностных расчетов для конструкции целиком позволяет определить преимущественные зоны трещинообразования при термомеханических нагрузках. Однако, собственно выявление таких областей не позволяет прогнозировать сроки службы, вследствие сложной зависимости динамики накопления повреждений материала от параметров эксплуатации конструкции и их флуктуаций. Несмотря на это, данная задача может быть решена при использовании многоуровневого подхода, последовательно сводящего задачу прогнозирования к моделированию разрушения представительного объема материала в условиях известного внешнего воздействия и последующего проецирования рассчитанной средней скорости роста трещины на размерный уровень промышленного агрегата. В данном случае под скоростью роста трещины понимается не ее мгновенное значение, определяемое упругими свойствами материала, а среднее значение прироста длины трещины за технологический цикл (например, период обработки порции металла – плавку), соответственно, стойкость футеровки может быть определена в плавках или количестве теплосмен. Расчет положения зоны инициации и направления роста трещины может выполняться как прямым моделированием, так и путем анализа результатов статического или квазистатического расчета полей напряжений и деформаций, а динамика роста трещин может быть определена при использовании энергетического подхода.

Во второй главе выполнена математическая постановка задачи. Приведены основные уравнения и определяющие соотношения. Разработана математическая модель ККМ, основанная на различном упругом поведении материала в целом и составляющих фаз за счет множественных границ раздела: пластические деформации индивидуальных фаз ККМ в пределах применимости предложенной модели нулевые или стремящиеся к нулю, а интегральные пластические деформации композиционного материала существенно отличны от нуля:

$$\begin{cases} d\varepsilon_{phase}^p \approx 0 \\ d\varepsilon_{material}^p \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Особенности ККМ, описываемые зависимостями (1), позволяют рассматривать такие материалы на уровне микроструктуры как комбинацию хрупких структурных элементов. Таким образом, *в интервале температур,*

когда компоненты материала сохраняют хрупкие свойства (автором предложен экспериментальный способ определения этого интервала) *рост трещины докритического размера может быть описан упрощенными зависимостями.* Это позволяет пренебречь упругим изменением объема в соотношениях Дюамеля-Неймана и использовать для дальнейших приближенных вычислений только первое слагаемое этого выражения (погрешность при этом для хрупких материалов составит около 5% с учетом фактического значения коэффициента Пуассона – около $0,1 \div 0,15$):

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{ij}^e. \quad (2)$$

де σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, ε_{ij}^e – компоненты упругой части тензора деформаций, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Разрушение конструкционных материалов по квазихрупкому сценарию состоит из трех последовательных стадий (рисунок 1):

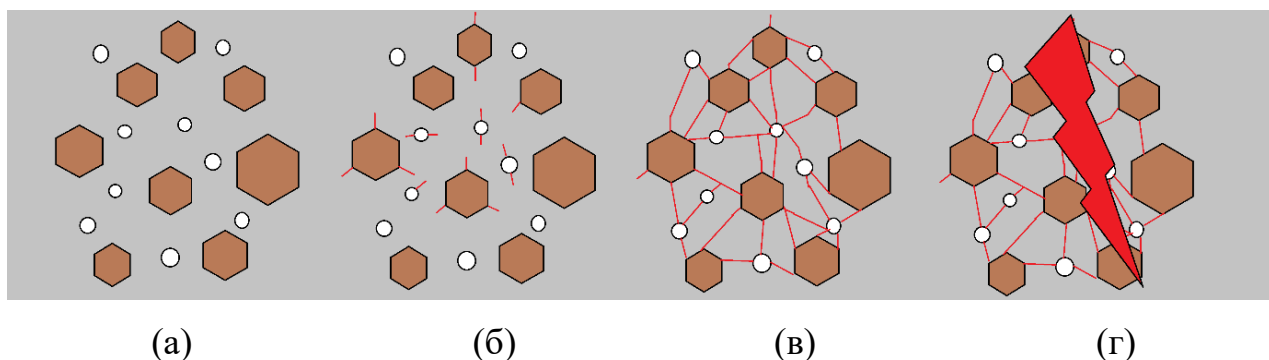


Рисунок 1. Этапы развития трещины при квазихрупком или усталостном разрушении композиционного керамического материала: а – трещины отсутствуют (исходное состояние), б – появление микротрещин на концентраторах напряжений, в – образование трещиноватой структуры на участке материала, г – рост катастрофической (разрушающей) трещины.

- Стадии упругой деформации, характеризующейся линейной зависимостью напряжений в материале от возникающих деформаций. (рисунок 1а).
- Квазихрупкой стадии, которая характеризуется изменением характера зависимости напряжений от деформаций, и которая является определяющей для ресурса эксплуатации конструкции. На данной стадии происходит множественное образование и рост трещин докритического размера на уровне структуры материала (микро и, иногда, мезо уровни) с образованием микротрещиноватой структуры, которое в пределе приводит к деградации механических свойств объекта (рисунок 1б и в).
- Стадия катастрофы или обострения характеризуется резкой, чрезвычайно быстрой деградацией функциональных свойств объекта, сопровождается образованием одной или нескольких трещин макроскопического размерного уровня (рисунок 1г).

Сформулированы типичные граничные условия, возникающие в задачах, связанных с промышленной эксплуатацией материалов при высокой

температуре: тепловые граничные условия первого или третьего рода на поверхностях футеровки и кожуха оборудования и кинематические условия для решения механической задачи по границам расчетной области.

Вводится градиентный деформационный критерий разрушения, позволяющий определять области возникновения трещин и направления их роста по статическим или квазистатическим (построенным для определенного момента нагрева или охлаждения объекта на основе «текущего» состояния температурного поля) полям компонентов НДС:

Распространение трещины при хрупком или квазихрупком механизме разрушения и наличии градиента поля максимальных главных упругих деформаций происходит в направлении от их максимума к минимуму, при этом рост трещины начинается в наиболее напряженной растяжением (деформированной) области конструкции. Максимумы и минимумы напряжений (деформаций) в зависимости от конкретных условий могут носить как глобальный, так и локальный характер. Иными словами, рост трещины начинается в наиболее (локально) растянутой области материала и продолжается в сторону ближайшей области сжатия или локального минимума растягивающих деформаций:

$$\begin{cases} d\vec{l} = -\text{grad}(\varepsilon_1^0) \cdot f\left(\frac{dU}{\gamma}\right) \\ \varepsilon_1^0 \equiv \varepsilon_1(x_i^0) = \max \varepsilon_1(x_i), \\ \varepsilon_1^0 \geq \varepsilon_1^{cr} \end{cases} \quad (3)$$

где $d\vec{l}$ – линейное приращение трещины x_i^0 – геометрическое место максимума зависимости максимальной главной упругой деформации (или максимального главного напряжения от координат), ε_1^{cr} – критическое значение упругой деформации материала при растяжении (допускается использовать аналогичное условие в терминах критического значения главного напряжения).

Кроме того, критерий позволяет определять площади (длины) прироста трещины в процессе «разгрузки» поля напряжений (деформаций) в окрестности вершины трещины. Под «разгрузкой» понимается расходование энергии упругой деформации материала на образование новой поверхности трещины, сопровождающееся соответствующим уменьшением напряжений в окрестности ее вершины. Для определения приращения площади поверхности трещины (dS) может быть использована зависимость:

$$dS = \frac{dU^e}{\gamma}, \quad (4)$$

где γ – удельная поверхностная энергия термодинамической фазы, а dU^e – энергия упругой деформации, израсходованная на приращение трещины, которая может быть определена интегрированием выражения:

$$U = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^e, \quad (5)$$

где U – энергия упругой деформации (локальное значение), σ_{ij} – напряжения в точке, ε_{ij}^e – упругие деформации в точке. Ввиду неоднородности полей напряжений и деформаций для реальных тел при расчете накопленной энергии

упругой деформации необходимо использовать численные методы. Выражение (5) позволяет определить локальное значение энергии упругой деформации, а для некоторого объема, в котором происходит рост трещины используется зависимость:

$$dU^e = \frac{(\sigma_1)^2 \cdot dV}{2 \cdot E} = \frac{E \cdot (\varepsilon_1^e)^2 \cdot dV}{2}, \quad (6)$$

где dV – объем материала, за счет накопленной энергии упругой деформации которого происходит трещинообразование.

Предложенный критерий экспериментально валидируется на примере расчета направлений распространения трещин при термомеханическом нагружении блоков пресноводного льда. На рисунке 2 приведен результат расчета температурных зон блока (а), поля деформаций (б) и фотография фактического расположения трещины (в) для случая локального нагрева центральной части короткой стороны объекта. «Синяя» область на схеме температурных зон соответствует хрупкому характеру разрушения материала, в «красной» области эпюры образование хрупких трещин невозможно, однако возможен ее разрыв по пластическому механизму при выходе трещин за пределы «синей» зоны. На рисунке линиями отмечены направления максимума градиента упругих деформаций образца, вдоль которых и произошло его разрушение.

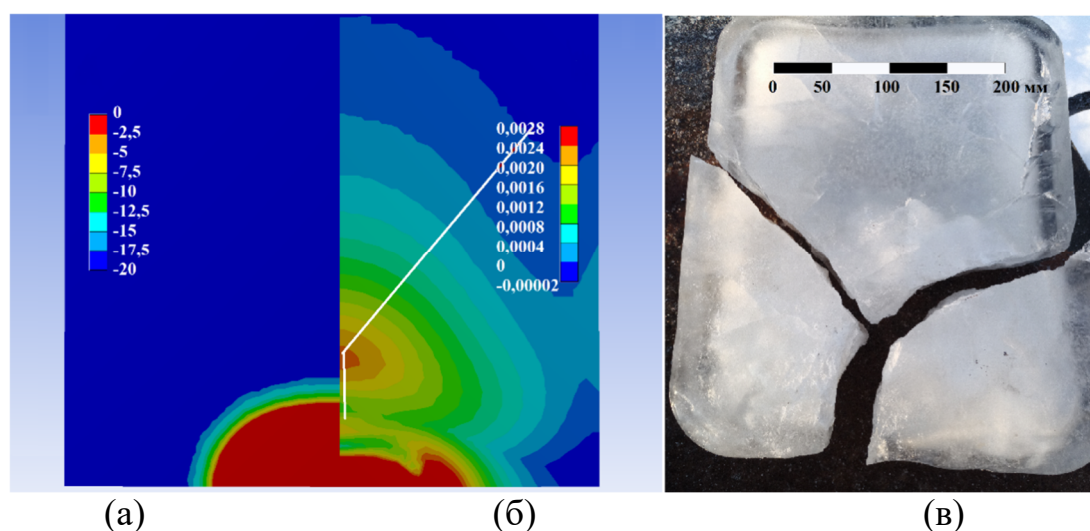


Рисунок 2. Температурные зоны, °С (а), направления максимальных градиентов упругих деформаций (б) и фактическая картина разрушения (в) при точечном нагреве центра короткой грани ледяного образца

Третья глава посвящена рассмотрению аспектов предложенной математической модели, связанных со структурными особенностями ККМ. Предложен и валидирован алгоритм определения геометрических параметров пустот в композиционных материалах путем анализа зернового состава шихты и условий термообработки материалов, основанный на методе Монте-Карло. Предложенный алгоритм позволяет сокращать представительный объем материала для ускорения расчетов (на основании предположения о том, что матричная составляющая материала разрушается в первую очередь, за счет своей меньшей прочности и большей плотности дефектов), а также проводить экспресс

оценку геометрических параметров концентраторов напряжений, образующихся на стадии получения материала, без проведения металлографического исследования. Численно исследованы особенности распределения напряжений и деформаций на границах раздела фаз с различными упругими характеристиками при разном характере внешней нагрузки.

Предлагается метод определения температурной границы между областями с различными упругими свойствами в ККМ, основанный на стандартных лабораторных испытаниях материалов (ГОСТ 4070-2000), в случае если формирование таких областей обусловлено термическими процессами (предплавление). Изменение упругих свойств материалов при нагревании является причиной проявления пластических свойств нагретым материалом и определяет температурную границу применения модели хрупкого разрушения к огнеупорным материалам. Для распространенных огнеупоров черной металлургии проявление пластических свойств наблюдается при температуре 1350 – 1450 °С и выше.

Также численно исследовано влияние расстояния между концентраторами напряжений микроструктурного размерного уровня на трещинообразование в их окрестности. Выявлены возможные точки зарождения трещин в зависимости от этого расстояния и вида нагрузки. В зависимости от направления нагрузки и упругих свойств матрицы и зерновой фракции материала в простых случаях растяжения и сжатия может быть проведена быстрая оценка направления распространения трещины на уровне структуры материала.

Показано, что взаимное влияние концентраторов напряжений и расстояние между ними на уровне конструкций является причиной формирования хаотической либо приуроченной к конструктивным особенностям оборудования картины разрушения огнеупорной футеровки на примере сталеразливочных ковшей разной емкости (рисунок 3).

Также показано, что при наличии внутреннего давления в материале, возникающего, например, при сушке бетонных конструкций (удалении технологической влаги) внешние механические и термомеханические воздействия, за исключением всестороннего сжатия, приводят к возрастанию механических напряжений на концентраторах, индуцированных внутренней нагрузкой, либо собственным термическим расширением материала. Всестороннее сжатие может существенно снижать локальные напряжения на концентраторах в конструкциях, вызванные иными причинами.



Рисунок 3. Локализация областей разрушения в оборудовании малого, диаметр 1,5 м (слева) и большого, диаметр 5 м (справа) размера.

Четвертая глава представляет развитие предложенной модели ККМ и посвящена исследованию разрушения материалов при формировании докритических трещин на уровне структуры материала и состояния материала перед образованием разрушающей магистральной трещины на уровне агрегата или изделия. Само образование магистральной трещины может быть спрогнозировано путем определения критического размера микротрещины с использованием интегральных характеристик материала (по Мураками) и известных условий его эксплуатации, либо определения критической нагрузки, необходимой для быстрого роста наиболее крупных микротрещин, обусловленных технологией производства материала. Интервал времени, в течение которого формируется трещина критического размера, или участок диаграммы деформирования от начала роста первых микротрещин на концентраторах до образования магистральной трещины (достижения критического размера микротрещины) является зоной проявления квазихрупких (ограниченных пластических) свойств композиционных материалов, которая является определяющей для ресурса эксплуатации ККМ. Для исследования процесса трещинообразования применен энергетический подход: считается, что накопленная в материале энергия упругой деформации может быть израсходована на образование новой поверхности при росте трещин. Одновременно, будет происходить разгрузка НДС. Сценарий развития отдельной микротрещины зависит от скорости накопления деформаций в материале: отношения скорости притока энергии за счет внешней деформации к ее работе и диссипации при трещинообразовании. При этом возможна либо остановка трещины в толще материала, или на препятствии (например, армирующем зерне), либо разрушение этого препятствия и дальнейший рост трещины, либо изменение направления роста трещины на границе областей материала с разными упругими свойствами. Рассмотрено влияние скорости приложения нагрузки на характер разрушения материала.

Предложен способ вычисления скорости деформации ККМ, требуемой для вовлечения зерен армирующего каркаса в процесс трещинообразования.

Разрушение как правило, начинается в матрице, как менее прочной составляющей материала, а при высокой скорости нагружения наблюдается объемное разрушение, обусловленное вовлечением в процесс зерен армирующего каркаса. Это объясняется запаздыванием разгрузки НДС и накоплением напряжений, вследствие различной скорости распространения деформации и роста трещин. Критическая скорость деформации, требуемая для вовлечения зерен каркаса в процесс разрушения, определяется выражением:

$$\left(\frac{d\varepsilon_1^e}{d\tau}\right)_{cr} = \frac{(\sigma_{cr}^t)_{gr}\omega_m}{E_{gr}xk}, \quad (7)$$

где $\left(\frac{d\varepsilon_1^e}{d\tau}\right)_{cr}$ – минимальная скорость деформации, требуемая для прохождения трещины через зерна каркаса, с^{-1} , $(\sigma_{cr}^t)_{gr}$ – предел прочности зерен на растяжение, Па, ω_m – скорость звука в матрице, м/с, E_{gr} – модуль упругости зерна, Па, x – расстояние от поверхности приложения нагрузки до рассматриваемого зерна, м, k – безразмерный коэффициент, связывающий скорость распространения трещин в матрице со скоростью звука (может принимать значения от 2 до 10). Применение зависимости (7) к типичным огнеупорам для оценки порядка величины $\left(\frac{d\varepsilon_1^e}{d\tau}\right)_{cr}$ показало, что для прохождения трещин через зерна необходима скорость нагружения порядка 10^2 с^{-1} или более. Данный тезис подтверждается также фиксируемыми значениями прочности материала при различных скоростях подачи нагрузки.

Прямой эксперимент по валидации зависимости характера разрушения огнеупора от скорости деформации был проведен по методу Кольского. Целью эксперимента было установление различного характера разрушения образцов ККМ, деформируемых с различной скоростью. Предполагалось, что при деформации с докритической скоростью область разрушения будет находиться преимущественно в матрице материала, а при более высоких скоростях деформации будет наблюдаться разрушение и его зернового каркаса – объемное разрушение. В качестве объекта исследования выступали серийные огнеупорные материалы, производства «Группы «Магнезит» периклазошпинельного состава. Образцы диаметром и высотой 50 мм нагружали ударным способом с различной скоростью движения ударника и, соответственно, упругой деформации, как превышающей вычисленный критический уровень 10^2 с^{-1} , так и с меньшей скоростью.

На рисунке 4 приведены по три последовательных кадра разрушения материала при скорости деформирования менее (а) – 80 с^{-1} и более (б) – 350 с^{-1} критической. Были зафиксированы значения прочности материала 60 и 110 МПа соответственно.

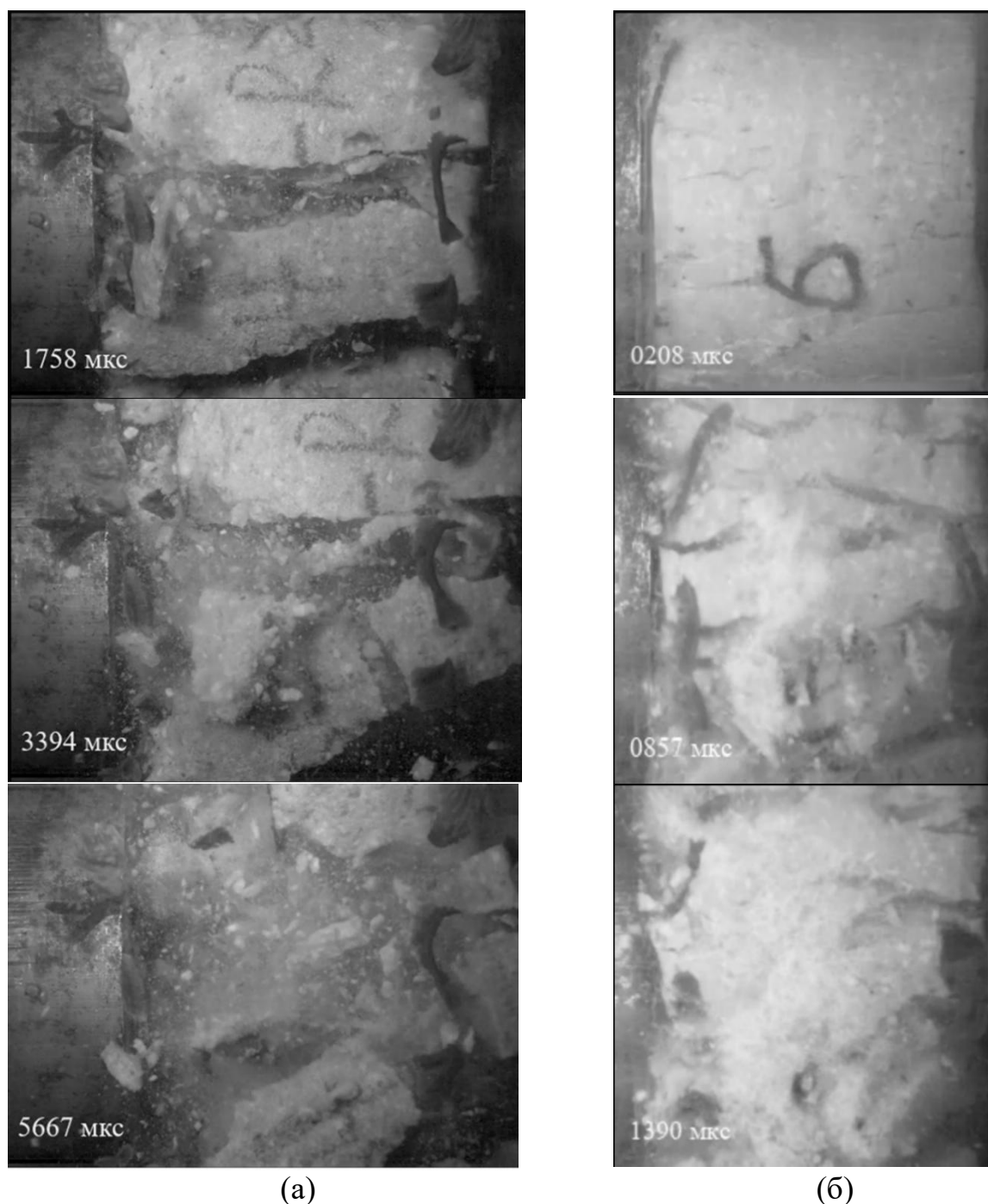


Рисунок 4. Характер разрушения огнеупорного материала при малой (а) и высокой (б) скорости деформации.

При малой скорости деформирования (рисунок 4а) происходит разрушение материала на крупные блоки. Трещины проходят преимущественно по матрице или границам раздела между матрицей и зернами каркаса. На рисунке видно, что фрагменты представляют собой либо отдельные зерна каркаса, размером около 2 мм, либо блоки включающие зерна каркаса и прилегающие фрагменты матрицы, в этом случае размер обломков составляет 5 мм и более. При быстром нагружении (рисунок 4б) – напротив, виден множественный рост трещин на начальной стадии, сменяющийся интенсивным объемным разрушением на некотором удалении от поверхности приложенной

нагрузки. Разрушение в этом случае фиксируется как в матрице материала, так и в зернах каркаса. Фрагменты на фото (рисунок 4б) представляют собой пылевидные частицы, размер которых можно оценить, как существенно меньший, чем типичный размер компонентов зерновой фракции, что подтверждает трещинообразование внутри зерен армирующего каркаса материала. Таким образом, экспериментально показано изменение характера разрушения ККМ при увеличении скорости деформирования сверх расчетного критического значения. Разрушение в докритической области представлено образованием крупных блоков материала с прохождением трещин по границам раздела зерен каркаса и матрицы, зерна при этом в основном не подвергаются разрушению. В закритической области происходит объемное разрушение материала на мелкие пылевидные фрагменты, причем разрушению подвергаются и зерна каркаса.

Подробно рассмотрено определение направлений роста трещин, образующихся при термомеханических нагрузках на примере локального нагрева блоков пресноводного льда. На рисунке 5 приведена эпюра упругих деформаций для определения направления роста трещины в блоке при его несимметричном нагреве. Направления максимальных скоростей изменения упругих деформаций (градиентов) от растяжения к сжатию показано линиями 1 – 5.

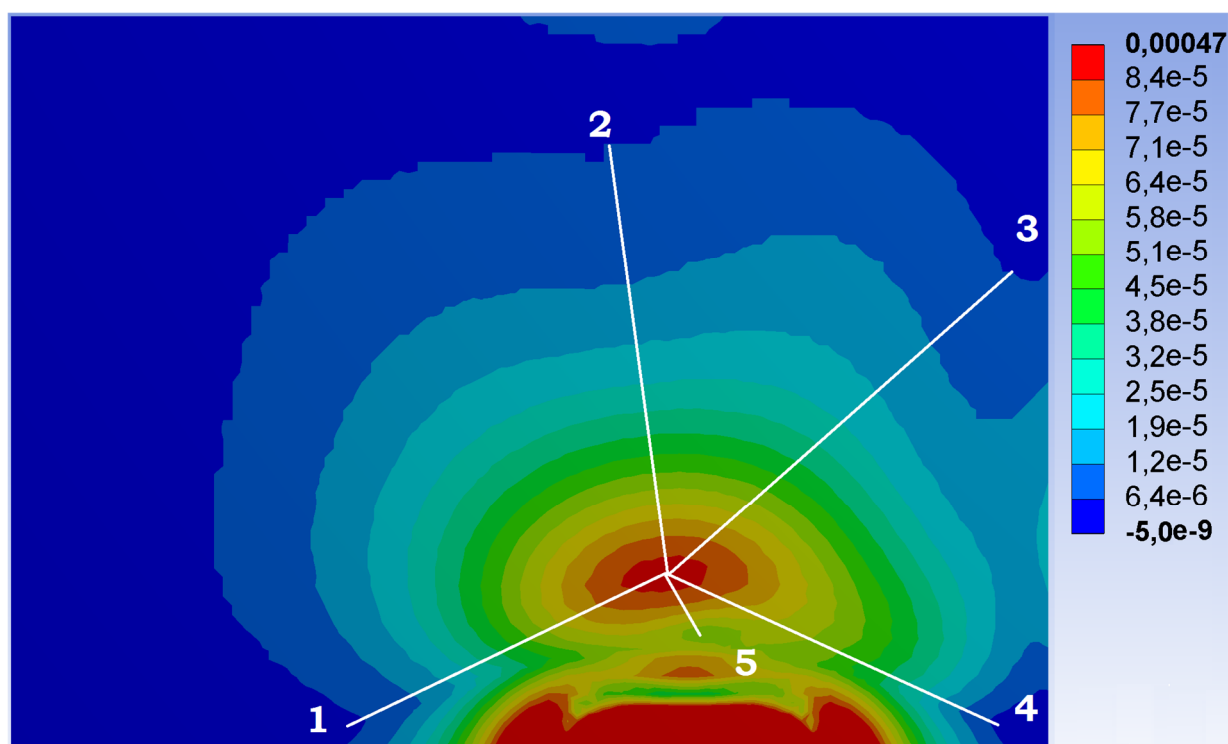


Рисунок 5. Эпюра упругих деформаций и возможные направления роста трещин при несимметричном нагреве блока из пресноводного льда.

В таблице 1 приведены значения скоростей изменения упругой деформации для выявленных направлений. Ввиду того, что направление 5 соответствует росту трещины в сторону горячей поверхности, где материал за

счет повышенной температуры обладает пластическими свойствами, оно исключается из расчета. Соответственно, приоритетным направлением для трещины является вариант 4.

Таблица 1.

Скорость изменения упругих деформаций для альтернативных направлений роста трещин, мм^{-1} .

Измерение	Номер направления				
	1	2	3	4	5
1	0.00078	0.00136	0.00105	0.00094	0.00157
2	0.00059	0.00042	0.00039	0.00099	0.00158
3	0.00042	0.00084	0.00078	0.00093	0.00105
4	0.00041	0.00019	0.00021	0.00081	0.00099
Среднее	0.00055	0.00070	0.00061	0.00092	0.00130

На практике, вид образовавшихся трещин приведен на рисунке 6. Красными (сплошными) стрелками обозначена основная трещина (совпадающая с рассчитанным направлением 4), синими (контурными) стрелками – ее боковые вторичные ответвления за счет роста из локальных максимумов упругих деформаций (позади вершины растущей трещины), образующихся при движении трещины вдоль границы раздела областей материала, обладающих различными упругими свойствами за счет явлений предплавления при его локальном нагреве. Таким образом, предложенный подход позволяет прогнозировать появление вторичных трещин в средах с переменными упругими характеристиками. Кроме того, прогнозируется и наблюдается на практике остановка трещин, растущих в направлении меньшей упругости материала, например, рисунок 5 направление 5.

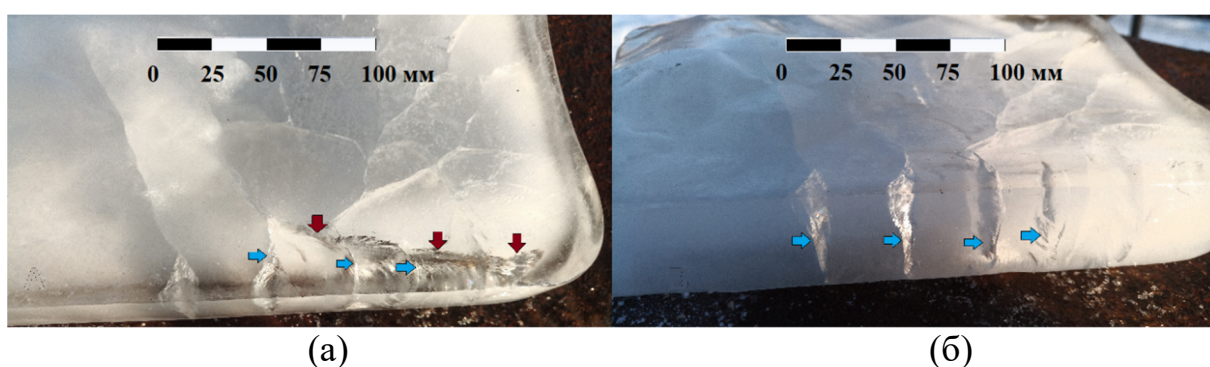


Рисунок 6. Вид трещин, образовавшихся при несимметричном нагреве блока пресноводного льда. (а) – вид сверху, (б) – вид сбоку (со стороны поверхности нагрева). Красные стрелки – основная трещина, синие – боковые ответвления.

В пятой главе рассмотрены практические приложения разработанных модели разрушения ККМ и многоуровневого подхода к прогнозированию ресурса конструкций. Описаны причины и динамика возникновения

градиентного поля температур в высокотемпературных конструкциях, приводящего к образованию соответствующих полей напряжений и деформаций макроуровня, вследствие термического расширения материалов, в том числе в стесненных условиях. Показано, что градиентным температурным полем обусловлено наличие, расположение и размеры областей конструкции, подверженных хрупкому разрушению или пластическим деформациям.

В частности, проанализирован процесс разрушения изделий для футеровки сталеразливочных ковшей в зависимости от особенностей их монтажа. На примере этого оборудования продемонстрирован многоуровневый подход к моделированию трещинообразования в конструкциях: выявлены ожидаемые зоны разрушения, рассчитаны преимущественные направления роста трещин в отдельных изделиях и проведена оценка средней скорости их роста на основании энергетического подхода.

Для рабочей футеровки сталеразливочных ковшей используются изделия (кирпичи) клиновидной формы с различной разностью длины оснований (по рабочей и тыльной поверхностям соответственно). Рабочая грань кирпича свободна всегда и направлена внутрь агрегата, в то время как боковые (границы между соседними кирпичами в одном ряду кладки), тыльная (граница с арматурным слоем футеровки, находящимся между корпусом оборудования и рабочей футеровкой) и горизонтальные (границы между соседними рядами футеровки по вертикали) грани могут испытывать внешнее воздействие со стороны соседних изделий. Интенсивность такого воздействия может быть различной: от нулевой до полной невозможности расширения изделия в указанном направлении. Схема типового изделия для рабочей футеровки сталеразливочного ковша приведена на рисунке 7.

В зависимости от интенсивности внешнего воздействия на закрепленные поверхности изделия (как правило, за счет наличия или отсутствия степени свободы для собственного термического расширения) возможна реализация нескольких вариантов направления роста трещин в таких изделиях, анализ которых приведен ниже.

Граничные условия могут быть записаны следующим образом (индекс k относится к пронумерованным граням на рисунке 7 и, соответственно, принимает значения от 1 до 6:

$$\begin{cases} T^{k=3} = const; T^{k=4} = f(x_3), const \\ u^{k=3}_{\perp} = f(T, \alpha); u^{k=1,2,4,5,6}_{\perp} = f(T, \alpha), 0 \end{cases} \quad (8)$$

то есть для рабочей поверхности ($k=3$) используются температурные условия первого рода, для тыльной грани ($k=4$) могут быть использованы температурные условия первого или третьего рода, в последнем случае на этой грани, в том числе может возникать температурный градиент. Рабочая поверхность при этом всегда свободна — ее перемещения, в том числе в перпендикулярном направлении определяются температурой T и коэффициентом теплового расширения материала α , для остальных граней может соблюдаться свобода расширения, либо может быть установлено боковое стеснение: в этом случае их перемещения перпендикулярно плоскости контакта будут запрещены.

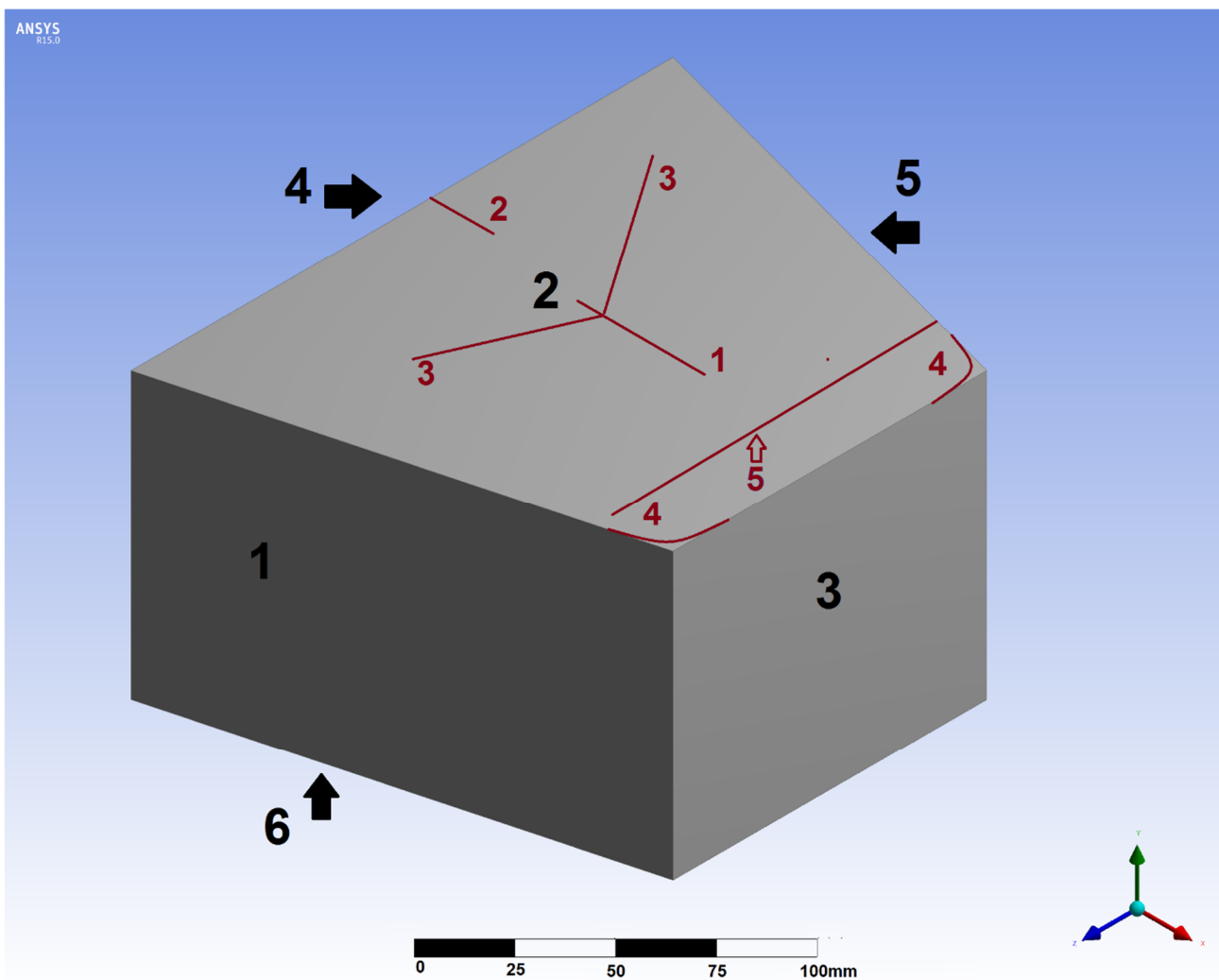


Рисунок 7. Грани футеровочного кирпича (черные обозначения): 1 и 5 – боковые, 2 и 6 – горизонтальные, 3 – рабочая, 4 – тыльная. Возможные направления роста термических трещин (красные обозначения): 1, 2 – радиальные, 3 – V-образные, 4 – разрушение углов и ребер, 5 – скол рабочей грани изделия.

При свободном положении всех сторон изделия, во время резкого нагрева рабочей грани формируется зона значительных упругих деформаций в средней части внутри изделия, максимальный градиент которых направлен к горячей поверхности кирпича (обозначен линией на рисунке 8а). Соответственно, следует ожидать разрушения изделий по оси симметрии в вертикальной плоскости (направление 1 на рисунке 7).

В случае, если перемещение в боковом направлении невозможно (изделия одного ряда плотно прилегают друг к другу, компенсаторы бокового расширения отсутствуют) максимальные упругие деформации формируются в центральной части тыльной грани изделия (рисунок 8б). Максимальный градиент деформации также направлен вдоль оси симметрии, параллельной плоскости XY. Трещина в этом случае располагается по направлению 2 на рисунке 7.

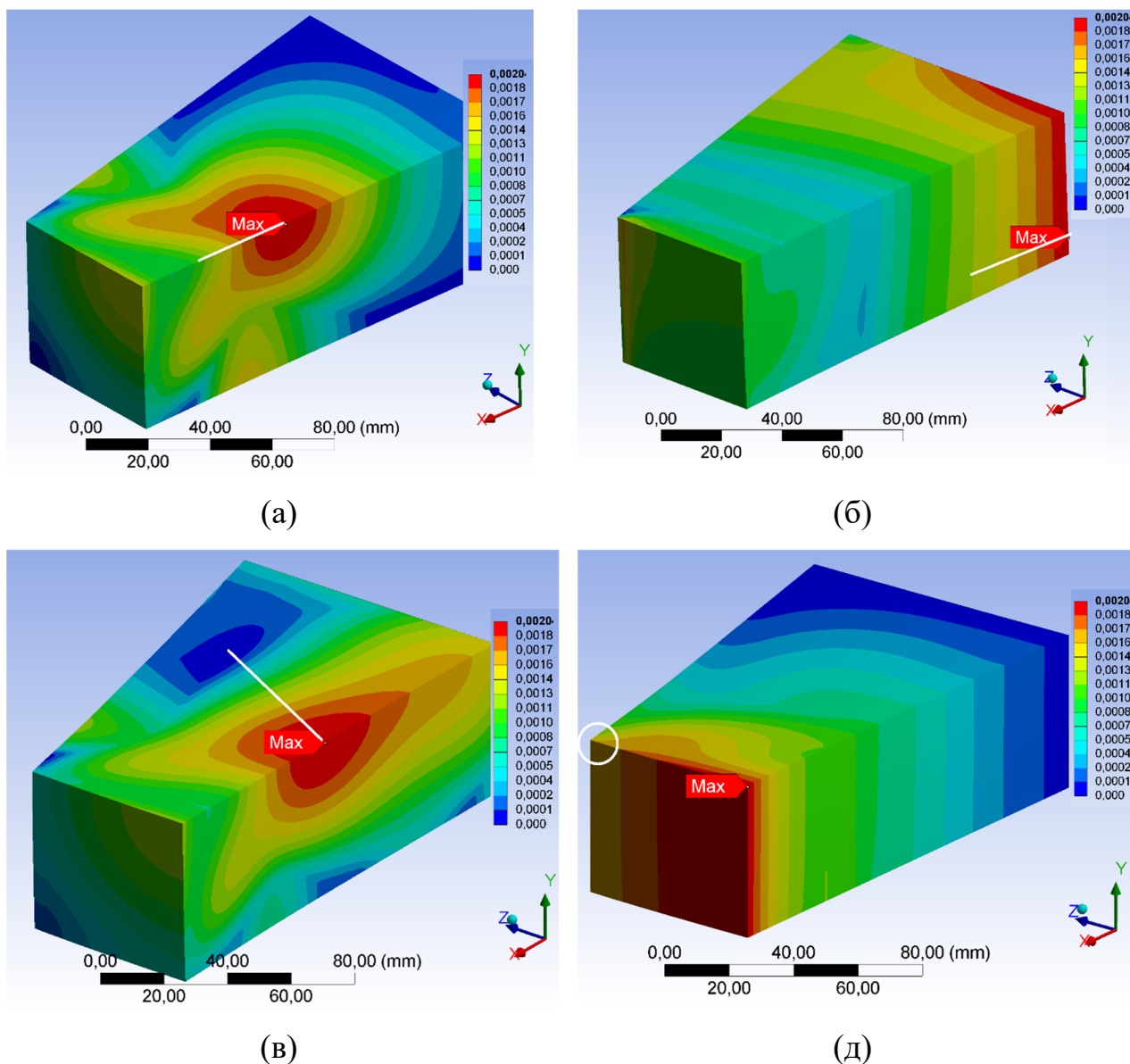


Рисунок 8. Поле упругих деформаций при резком нагреве огнеупора (Сечение плоскостями, параллельными XY и XZ): (а) – при незначительном зажатии граней, (б) – при боковом стеснении изделия, (в) - в случае тыльного стеснения, (д) - при вертикальном стеснении изделия.

При зажатии тыльной грани формируются боковые зоны локального сжатия при сохранении центральной зоны растяжения. Соответственно формируется градиент деформаций, располагающий к росту вертикальных (параллельных оси Y) трещин от центральной части изделия в направлении углов тыльной грани (рисунок. 8в). В этом случае длина траектории трещины может возрастать до 2 раз в зависимости от геометрической формы изделия по сравнению с радиальным растрескиванием (направление 3 рисунок 7).

При вертикальном стеснении изделий возникают условия для разрушения в угловых зонах рабочей грани (рисунок 8д), там формируется максимальный градиент упругих деформаций (область 4 на рисунке 7). Однако, температура этой зоны превышает уровень, при котором возможно разрушение огнеупора по

хрупкому механизму, соответственно имеют место пластические деформации, приводящие к скруглению угловых ребер и расширению швов.

При комбинации различных вариантов стесненных условий наиболее напряженные зоны в изделиях формируются также в окрестности вертикальных ребер рабочей грани изделия.

Следует отметить, что в огнеупорных футеровках часто наблюдаются сколы изделий, параллельные рабочей поверхности (рисунок 7, направление 5), которые, согласно расчетам, могут возникать на ранних стадиях нагрева – в течение его первых нескольких секунд, пока температура в этой области не превысила значение «хрупко-пластического» перехода. На рисунке 9 приведены эпюры упругой деформации для различных моментов времени процесса нагрева.

На рисунке. 9а видны зоны растягивающих деформаций на горизонтальном (параллельном плоскости XZ) сечении в окрестности вертикального ребра рабочей грани. В то же время, ближайшая зона сжатия находится на незначительном удалении от рабочей поверхности в центральной части изделия. С учетом того, что в рассмотренных условиях нагрева (5 секунд после контакта рабочей поверхности с расплавом) температура этой области соответствует условиям хрупкого разрушения – возможно образование скола, параллельного рабочей поверхности.

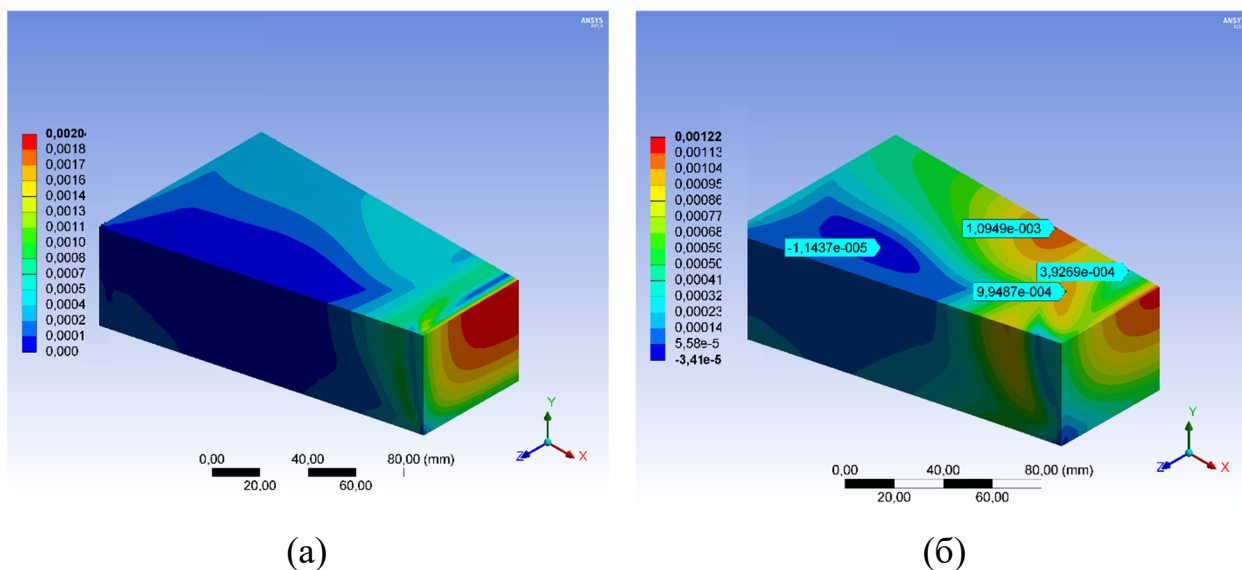


Рисунок 9. Развитие упругих деформаций при резком нагреве рабочей грани огнеупора. (а) – 5 секунд после начала нагрева, (б) – 50 секунд.

В дальнейшем (рисунок 9б) картина деформаций трансформируется – основной зоной растяжения становится центральная часть изделия, возникают два альтернативных направления роста трещины: из центра изделия в радиальном направлении, перпендикулярно рабочей грани (при свободном закреплении или боковом стеснении), либо в сторону вертикальных ребер тыльной грани с образованием V – образных трещин (при зажатии тыльной грани). Рассмотренные выше варианты возникновения трещин в рабочих

футеровках высокотемпературного оборудования часто наблюдаются на практике – рисунок 10.



Рисунок 10. Виды трещин в огнеупорах. (а) – V-образные трещины, (б) – параллельные рабочей грани, (в) – радиальные, перпендикулярно рабочей грани, (г) – выкрашивание и размытие углов рабочей грани при комплексной нагрузке.

Кроме того, в главе 5 рассмотрен рост трещин в огнеупорных изделиях при их испытании на термостойкость и рост усталостных трещин в прессовой оснастке для производства огнеупоров сложной геометрической формы. Приведен пример использования многоуровневого подхода для анализа аварийной ситуации, возникшей во время сушки путем одностороннего нагрева крупногабаритного бетонного изделия – брызгозащитного экрана установки вакуумной обработки стали (VD-VOD). На примере изделий для футеровки мартеновской печи с применением градиентного деформационного критерия показано влияние скорости разогрева футеровки на образование сколов рабочей грани огнеупоров.

В заключении диссертации формулируются основные результаты и выводы, даются рекомендации по практическому применению результатов исследования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

При решении поставленных задач были получены следующие оригинальные результаты:

1. Предложена методика последовательного сокращения размера расчетной области от агрегата до представительного объема микроструктуры материала с определением локализации, направления и скорости роста трещин. Оптимальным для решения задачи признано выделение до трех

- размерных уровней детализации: агрегат, изделие (блок) и материал (структура).
2. Введен градиентный деформационный критерий, позволяющий одновременно определять область возникновения и направление вектора роста трещин путем анализа статических (квазистатических) полей упругих деформаций (максимальных главных напряжений) для разных моментов времени при выполненном расчете динамического температурного поля.
 3. Сложная структура ККМ, представленная многочисленными фазами и границами их раздела использована с целью создания простой инженерной модели разрушения таких материалов. Предложенная модель основана на возможности применения разных моделей разрушения на различных размерных уровнях конструкций (агрегат, изделие, структура). В частности – в широком интервале температуры микроструктурные компоненты материала разрушаются как хрупкие фазы, а взаимодействие вершин растущих трещин с границами раздела фаз обуславливает проявление пластических эффектов разрушения. Использование энергетического подхода позволяет оценивать время накопления энергии для разрушения материала и прогнозировать его ресурс.
 4. Получена количественная оценка для понятий «близко» и «далеко» для системы дефектов конструкции или структуры материала: через характерные размеры оборудования или структурных элементов материала вычислены размеры области, внутри которой скорость и направление роста трещин будут испытывать влияние соседних дефектов.
 5. Предложен способ определения границы интервала температур, в котором происходит переход от хрупкого характера разрушения огнеупорного материала к его пластическим деформациям, основанный на стандартных (ГОСТ и ISO) методах лабораторной аттестации таких материалов. Полученный результат также определяет температурную область применимости моделей хрупкого разрушения к огнеупорным материалам.
 6. Предложен способ численного описания структуры и геометрических параметров концентраторов напряжений огнеупорного материала на основе данных об использованных исходных компонентах для его синтеза. Полученный результат позволяет оценивать фактические локальные напряжения в материале, приводящие к началу роста трещин. Применение компьютерного моделирования позволяет получать оценку геометрических параметров концентраторов напряжений в материале, не прибегая к затратному по времени металлографическому способу.
 7. Численно и экспериментально исследованы закономерности роста трещин в гетерофазных материалах и материалах, обладающих градиентом упругих характеристик (например, за счет наличия градиентного температурного поля). Предложено объяснение различного характера разрушения ККМ в зависимости от скорости приложения механического воздействия и изменения направления роста трещины на границе зон

материала с различными упругими свойствами как для границ разных термодинамических фаз, так и для границ температурных зон для случая материала, находящегося в градиентном температурном поле вблизи температуры фазового перехода.

При эксплуатации, в металлургических процессах огнеупоры подвергаются комплексным воздействиям: резким перепадам температур, механическому и химическому воздействию, в результате в огнеупорных конструкциях развиваются термомеханические напряжения, которые могут инициировать разрушение, протекающее по квазихрупкому механизму, либо (при высокой температуре) привести к пластическим деформациям материала – ползучести. Полученные в работе результаты могут быть применены для анализа причин разрушения огнеупорных конструкций в службе, а также при конструировании оборудования с целью прогноза его ресурса, либо для определения целевых свойств вновь разрабатываемых материалов при известной области их применения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Журналы из перечня ВАК по специальности 1.1.8:

1. Заболотский А.В., Дмитриев А.И. Численное исследование направления роста трещины в квазихрупком материале в градиентном поле температуры // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 88. С. 94–110. [doi: 10.17223/19988621/88/8](https://doi.org/10.17223/19988621/88/8)
2. Заболотский А.В., Дмитриев А.И. Применение градиентного деформационного критерия для анализа термомеханического разрушения огнеупоров в поле температур // Проблемы прочности и пластичности Т. 86 № 3 (2024): с. 285-298.
3. Заболотский А.В., Дмитриев А.И. Влияние скорости деформации квазихрупких композиционных огнеупорных материалов на характер их разрушения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 97. С. 100–115. [doi: 10.17223/19988621/97/7](https://doi.org/10.17223/19988621/97/7)
4. Заболотский А.В. Оптимизация фазового состава огнеупора включениями с трещинами для повышения ресурса футеровки. Моделирование и эксперимент / А.В. Заболотский, А.И. Дмитриев, А.О. Мигашкин, А.А. Платонов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2025. Принято в печать.

Прочие журналы из перечня ВАК:

5. Заболотский А.В. Модель разогрева сталеразливочного ковша. Новые огнеупоры. 2010, № 8, с. 32 – 35.
6. Заболотский А.В. Математическое моделирование термостойкости оксида магния. Новые огнеупоры. 2011, № 6, с. 90 – 98

7. Заболотский А.В., Аксельрод Л.М., Овсянников В.Г. Объемное моделирование термических напряжений в футеровке циркуляционного вакууматора. Сталь, 2014 №12 с.10-14.

Статьи в журналах, индексируемых Scopus или Web of Science:

8. Grigoriev, A.S.;Zabolotskiy, A.V.; Shilko, E.V.;Dmitriev, A.I.; Andreev, K. Analysis of the Quasi-Static and Dynamic Fracture of the SilicaRefractory Using the Mesoscale Discrete Element Modelling. Materials 2021, 14, 7376. <https://doi.org/10.3390/ma14237376>
9. Заболотский А.В. Моделирование теплового поля футеровки сталеразливочного ковша. Инженерно-физический журнал, 2011, т. 84, №2, с. 318 – 323.
- 10.Заболотский А.В. Моделирование остывания сталеразливочного ковша. Инженерно-физический журнал, 2013, т. 86, №1, с. 191 – 195.
- 11.Заболотский А.В., Аксельрод Л.М., Дониц Р.А., Поспелова Е.И., Марченко Д.А. Математическое моделирование движения влаги в огнеупорных бетонах и торкрет-массах во время сушки. Новые огнеупоры № 12, 2016 с. 6-12.
- 12.Заболотский А.В., Аксельрод Л.М., Марченко Д.А. Моделирование процесса перемещения влаги в огнеупорном бетоне при сушке с помощью перколяционных структур Новые огнеупоры №. 8, 2018, с. 28 – 35.
- 13.Zabolotsky A.V. Thermal crack growth modeling in refractory linings of metallurgical installations. Int. J. of mathematical models and methods in applied sciences. 2011, v. 5, № 3, p 542 – 549.
- 14.Григорьев А.С., Данильченко С.В., Дмитриев А.И., Заболотский А.В., Мигашкин А.О., Турчин М.Ю., Хадыев В.Т., Шилько Е.В. Компьютерное моделирование влияния вспомогательных слоев футеровки сталеразливочного ковша на локализацию и направление роста термических трещин. Новые огнеупоры, № 10 (2022), стр. 3 – 15.
- 15.Zabolotskii , A., Khadyev, V., Dmitriev, A., & Shilko, E. (2022). A multilevel model for description of thermomechanical fracture of refractory linings of high-temperature equipment. Reports in Mechanical Engineering, 3(1), 237-245. <https://doi.org/10.31181/rme20028122022z>
- 16.Григорьев А.С., Данильченко С.В., Заболотский А.В., Мигашкин А.О., Турчин М.Ю., Хадыев В.Т. Особенности разрушения футеровок в оборудовании разного размера. Новые огнеупоры, № 12 (2022), с. 3 – 11.
- 17.Заболотский А. В., Мигашкин А. О., Григорьев А. С., Дмитриев А. И., Турчин М. Ю., Хадыев В. Т., Шилько Е. В. Моделирование зарождения трещин в материалах с регулярно расположенными сферическими порами в условиях многоосного нагружения Новые огнеупоры, № 3 2023, стр. 13 – 20.
- 18.Buyakov A., Shmakov V., Zabolotsky A., Chumakov Y., Shilko E., Refractory ceramics based on magnesium–aluminate spinel and periclase of the Satka

deposit, Materials Chemistry and Physics, V. 313, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128760>.

19. Мигашкин А.О., Кащеев И.Д., Заболотский А.В., Ковалев Е.В., Парфентьев В.Ф. Влияние добавки на основе алюминатов кальция на стойкость периклазоуглеродистых огнеупоров в сталеразливочных ковшах для медеплавильной промышленности. // Новые огнеупоры №3 2024, с. 4-8

Прочие публикации:

20. Zabolotsky A. V. Mathematics modeling of thermal shock in refractory linings. AISTech 2011 Proceedings, V.II, p. 1279 – 1287.
21. Zabolotsky A. V. Thermal crack growth modeling in refractory linings of metallurgical installations. Int. J. of mathematical models and methods in applied sciences. 2011, v. 5, № 3, p 542 – 549.
22. Заболотский А.В., Аксельрод Л.М., Вериковский В.Ю. Математическое моделирование температурного поля установки VD-VOD. Бюллетень «Черная металлургия». № 5, 2012, стр. 66 – 71.
23. Zabolotsky A.V. Thermal Shock and Modeling of Destruction for Refractory Linings of Metallurgical Installations. In R. Hetnarski (ed.), Encyclopedia of Thermal Stresses, DOI 10.1007/978-94-007-2739-7, Springer Science+Business Media Dordrecht 2013
24. Заболотский А.В., Аксельрод Л.М., Овсянников В.Г. Моделирование термонапряженного состояния футеровки патрубка циркуляционного вакууматора. Бюллетень «Черная металлургия». № 9, 2013, с. 52 – 59.
25. Zabolotskiy A.V., Akselrod L.M., Ovsyannikov V.G.. Mathematical Modeling of RH-degasser Pipe Thermal Strain. Refractories World Forum. V. 2, 2014 № 6, p 49 – 56.
26. Аксельрод Л.М., Ярушина Т.В., Заболотский А.В., Ефимов С.В., Яценко В.К., Афанасьев С.Ю. Способы увеличения продолжительности срока службы периклазоуглеродистых изделий в футеровке сталеразливочных ковшей ОМЗ-Спецсталь. Новые огнеупоры, № 3, 2016, стр. 90 – 93.
- 27.. Аксельрод Л.М, Ярушина Т.В., Заболотский А.В и др., Концептуальный подход к выполнению футеровки агрегатов сталеплавильного комплекса ДСП-120 "ОМЗ-Спецсталь". Бюллетень Черная металлургия, 2016, №9, стр. 82-89.
28. Заболотский А.В. Аксельрод Л.М. Моделирование разрушения крупных бетонных блоков при сушке под воздействием термической нагрузки. XV Минский Международный форум по тепло и массообмену. Минск 2016. Т. 3, С. 133-137.
29. Zabolotsky A.V., Axelrod L.M. Application of the Cell Automata Method to the Brittle Material Thermal Fatigue Fracture Simulation // Journal of Scientific and Engineering Research, 2017, 4(10):284-292
30. Zabolotsky A.V. Percolation theory usage for water transfer simulation while drying out of refractory castables. Int. J of Materials. v. 4, 2017, p 46 - 53. ISSN 2313-0555.

31. Заболотский А.В. Построение и исследование модели поровой структуры керамического материала. *Инновационная наука*. № 03-1/2017 стр. 27 - 34.
32. Заболотский А.В. Моделирование структуры связки керамического материала как перколяционного кластера второго порядка. Сборник статей международной научно-практической конференции "Совершенствование методологии познания в целях развития науки" в 3 ч./ Ч.3 - Уфа. Аэтерна, 2017, с. 67 - 76.
33. Заболотский А.В., Турчин М.Ю., Хадыев В.Т., Мигашкин А.О. Численное моделирование коэффициентов интенсивности напряжений для пространственной системы дефектов на примере периклазоуглеродистого огнеупора сталеплавильного производства. *Механическое оборудование металлургических заводов*. № 1(12), 2019, с 64-70.
34. Zabolotskiy A.V., Turchin M.Y., Khadyev V.T., Migashkin A.O. Numerical investigation of refractory stress-strain condition under transient thermal load // *AIP Conference Proceedings* 2310, 020355 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0034479>
35. Заболотский А. В., Борзов А.Н., Хадыев В.Т., Андреев К.П. Цифровизация промышленных тепловых процессов и агрегатов Бюллетень научно-технической и экономической информации. Т. 77, 2021. № 1, с. 209 – 214.
36. Shilko E.V., Grigoriev A.S., Lapshina A.A., Buyakov A.S., Shmakov V.V., Dmitriev A.I., Zabolotskiy A.V., Andreev K. Development of a mesoscale mechanical model of ceramic materials with multiscale porosity. Silica refractory case study. *AIP Conf. Proc.* 13 September 2023; 2899 (1): 020130. <https://doi.org/10.1063/5.0162808>