

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.

Высокотемпературные процессы в различных отраслях промышленности требуют изолирования реакционной зоны агрегата от окружающей среды для минимизации потерь тепловой энергии и предотвращения термических травм у обслуживающего персонала. Для эксплуатации в условиях непосредственного контакта с рабочей средой, температура которой может достигать 2000 °С, применяют огнеупорные материалы, получаемые в большинстве случаев на основе тугоплавких оксидов, карбидов или нитридов. Технология получения таких материалов определяет их сложную структуру, представленную зернами огнеупорного наполнителя различных размеров, матрицей и границами их раздела. Поверхностные явления на границах раздела фаз в материалах обуславливают проявление особых механических свойств такими материалами как при низкой, так и при высокой температуре. Причем, при низкой температуре особые свойства таких материалов обеспечиваются механическим взаимодействием растущих дефектов (трещин) с структурными элементами материала, что приводит к так называемому «квазихрупкому характеру разрушения», при котором материал, состоящий из хрупких индивидуальных фаз проявляет видимые пластические эффекты при росте трещины. При высокой температуре чаще всего огнеупорный материал начинает деформироваться из-за появления мезернами относительно легкоплавкой стеклофазы, что приводит к проявлению известного эффекта ползучести – заметным пластическим деформациям огнеупора во времени при воздействии механической нагрузки.

Эксплуатация огнеупорных материалов происходит в широком интервале температуры таким образом, что в футеровке промышленного оборудования одновременно присутствуют области, обладающие квазихрупкими свойствами при относительно низкой температуре и находящиеся в условиях пластической деформации при максимальных температурах эксплуатации. Сложная зависимость механических свойств огнеупоров от температуры является фактором, значительно осложняющим термомеханические расчеты и интерпретацию их результатов для определения ресурса эксплуатации материалов или анализа причин трещинообразования. Решение же этих задач необходимо для прогноза срока эксплуатации или возможностей модернизации футеровок тепловых агрегатов. Таким образом, цель, поставленная в диссертационной работе Заболотского А.В. направлена на решение **актуальной научно-практической задачи**, имеющей важное значение для предприятий, эксплуатирующих высокотемпературное оборудование (производство металла, строительных материалов, стекла и т.д.).

Структура диссертации представлена девятью разделами. Диссертация состоит из Введения, пяти Глав, Заключение, Списка литературы и шести Приложений. Всего диссертация содержит 301 страницу, 91 рисунок, 12 таблиц.

Во введении поставлены цель и задачи работы, обоснована актуальность темы и методика проведения исследования. Сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе, являющейся обзором литературы, кратко изложена история вопроса изучения разрушения квазихрупких композиционных материалов (ККМ), происходящего путем последовательного накопления повреждений. Всего в данном разделе использованы материалы из 293 источников. В этом разделе диссертации обосновывается тезис о том, что ККМ, вследствие особенностей своей структуры при различных

температурах, демонстрируют особые механизмы разрушения, требующие развития специфического многоуровневого подхода к прочностным расчетам для этого класса материалов. Показано, что использование интегральных характеристик материалов и выполнение прочностных расчетов для конструкции целиком позволяет определить преимущественные зоны трещинообразования при термомеханических нагрузках. Выявление таких областей не позволяет прогнозировать сроки службы оборудования, вследствие сложной зависимости динамики накопления повреждений материала от параметров эксплуатации конструкции и их флуктуаций. Несмотря на это, данная задача может быть решена при использовании результатов расчета механических напряжений (упругих деформаций) для агрегата в целом как граничных условий для моделирования роста трещин на представительном объеме структуры самого материала. Расчет зоны инициации и направления роста трещины может выполняться как прямым моделированием методами дискретных элементов, так и путем анализа результатов статического или квазистатического расчета полей напряжений и деформаций, а динамика роста трещин может быть определена при использовании энергетического подхода.

Вторая глава работы посвящена математической постановке задачи и разработке математических моделей структуры материала и трещинообразования в нем. Приведены основные уравнения, описывающие особенности структуры ККМ и их разрушения и определяющие соотношения. В рамках модели разрушения водится градиентный деформационный критерий, позволяющий определять области возникновения трещин и направления их роста по статическим или квазистатическим (построенным для определенного момента приложения механической или термомеханической нагрузки) полям компонентов НДС. Также, критерий позволяет вычислить прирост площади поверхности трещины при известной нагрузке. Предложенный критерий экспериментально проверяется. Разработаны основы многоуровневого

подхода для решения практических задач разрушения футеровок тепловых агрегатов.

Третья глава посвящена детальной проработке модели материала: рассмотрены типичные концентраторы напряжений в ККМ и конструкциях, суперпозиция полей напряжений и деформаций на системах таких концентраторов, характер изменения свойств материала в интервале температур эксплуатации и методика определения области инициации трещинообразования. Предложен алгоритм моделирования геометрической формы концентраторов напряжений в композиционных материалах путем анализа зернового состава шихты и условий термообработки материалов и метод определения температурной границы между областями с различными упругими свойствами, основанный на стандартных лабораторных испытаниях материалов по ГОСТ 4070-2000. Также численно исследованы некоторые практические аспекты применения модели – влияние расстояния между концентраторами напряжений на трещинообразование в их окрестности, влияние внутреннего давления на разрушение ККМ при их сушке и термообработке.

В четвертой главе подробно рассмотрена предложенная модель разрушения, в частности исследована стадия разрушения, на которой материал сохраняет свои функциональные характеристики – формирование трещин докритического размера. Образование разрушающей трещины может быть описано путем определения критического размера дефекта структуры с использованием интегральных характеристик материала и известных условий его эксплуатации, либо определения критической нагрузки, необходимой для быстрого роста наиболее крупных микротрещин, возможных для микроструктуры зернового каркаса материала. Участок диаграммы деформирования от начала роста первых микротрещин на концентраторах до достижения критического размера микротрещины является зоной проявления квазихрупких свойств композитов. Для исследования процесса трещинообразования автором применен

энергетический подход, кроме того рассмотрено влияние скорости приложения нагрузки на характер разрушения материала.

Пятая глава носит описательный характер: на большом количестве примеров (футеровка мартеновской печи и сталеразливочного ковша, лабораторное испытание огнеупора на термическую стойкость и т.д.) рассмотрены практические приложения разработанных модели материала, модели разрушения и многоуровневого подхода к прогнозированию ресурса конструкций.

В заключении диссертации формулируются основные результаты и выводы, описано направление дальнейшего практического применения результатов исследования. Наиболее **практически значимыми** результатами исследования являются:

1. Введение градиентного деформационного критерия, позволяющего одновременно определять область возникновения и направление вектора роста трещин путем анализа статических (квазистатических) полей упругих деформаций.
2. Разработка способа определения интервала температур, в котором происходит переход от хрупкого характера разрушения огнеупорного материала к пластическим деформациям, основанного на стандартных методах лабораторной аттестации таких материалов.
3. Способ численного описания структуры и геометрических параметров концентраторов напряжений огнеупорного материала на основе данных об использованных исходных компонентах для его синтеза.
4. 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 фаз, так и для границ температурных зон для случая материала, находящегося в градиентном температурном поле вблизи температуры фазового перехода.

В приложениях приведены акты о практическом применении результатов научных исследований, выполненных при подготовке диссертации.

Сформулированные соискателем в автореферате и диссертации задачи соответствуют поставленной цели, а полученные результаты имеют признаки **научной новизны**, в частности:

1. Применение градиентного деформационного критерия для оценки динамики роста трещин по результатам статических расчетов.
2. Разработанные модели материала и его разрушения, позволяющие определять границы температурного интервала квазихрупкого разрушения для огнеупоров и критическую скорость деформации, сверх которой происходит объемное разрушение композита.

Достоверность результатов обеспечена применением стандартных или распространенных методов экспериментальных исследований и надежных, проверенных методик численного моделирования. По теме диссертации опубликовано 36 статей, из них 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ (в том числе 4 – по специальности механика деформируемого твердого тела – 1.1.8), 11 статей в зарубежных или переводных изданиях, включенных в базы данных Scopus и Web of Science.

Название диссертации отражает ее содержание, которое соответствует выбранной специальности 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела. **Автореферат** соответствует содержанию диссертации и отражает основные результаты работы.

По диссертации имеются следующие **замечания**:

1. В работе приведен солидный литературный обзор по теме исследования. Однако в керамике и огнеупорах (которыми занимается

диссертант) классическими работами по стойкости к термическому удару считаются работы физика D.P.H. Hasselman. Он в 50-х годах сформулировал критерии стойкости к термическому удару керамики и огнеупоров, которыми специалисты по технологии огнеупоров и эксплуатации огнеупоров пользуются по сей день. Хассельман сделал попытку связать базовые физические свойства материала со стойкостью к термическому удару, его критерии приведены во многих учебниках. Критерии были сформулированы в 50-х годах, однако есть современные публикации по доработке критериев стойкости к термическому удару Хассельмана для огнеупорных конструкций и огнеупорных бетонов. Автору следовало бы как минимум дать ссылки на классические труды Хассельмана, сравнить подходы, развиваемые автором, с подходами Хасельмана.

2. Для выявления температурной зависимости упругих свойств огнеупорных материалов автор выбрал испытания на температуру начала деформации под нагрузкой (ГОСТ 4070-2000, ISO 1893-89) и определение предела прочности при изгибе при повышенной температуре (ГОСТ Р 50526-93, ISO 5014-86). Да, это правильный выбор. Далее автор пишет, что «при повышении температуры удлинение материала при расширении проходит максимум и в дальнейшем уменьшается, что свидетельствует о появлении жидкой фазы в материале и возможности пластической деформации. Температура этого максимума, как правило, определяет максимальную допустимую температуру эксплуатации для материала (как правило, на $100\div 200$ °С выше температуры начала деформации под нагрузкой)». С автором нельзя не согласиться, однако температура начала размягчения, которая и определяет предельную температуру безопасной эксплуатации – это не максимум на кривой «изменение линейных размеров – температура», а точка, соответствующая 1% или 2% деформации (в разных системах стандартизации по-разному), но разница между температурой максимума на кривой и температурой начала деформации может составить 50-200°С.

3. Замечание, которое следует рассматривать как пожелание по дальнейшим направлениям работы по теме диссертации. Мне представляется очень ценным то, что автор предложил алгоритм моделирования геометрической формы концентраторов напряжений в композиционных (огнеупорных) материалах и метод определения температурной границы между областями с различными упругими свойствами, основанный на стандартных лабораторных испытаниях огнеупорных материалов по ГОСТ 4070-2000 «ИЗДЕЛИЯ ОГНЕУПОРНЫЕ. Метод определения температуры деформации под нагрузкой». Нерешенной на сегодня задачей для огнеупорных материалов является установление связи между методом испытания термической стойкости (определяемой в числе термоциклов) при охлаждении сжатым воздухом и водой (ГОСТ Р 52542— 2006, ГОСТ 7875.2-2018) и физическими свойствами огнеупорных материалов (подход Хассельмана). Оригинальные подходы автора диссертации к решению этой проблемы будут приветствоваться.

Указанные замечания ни в коей мере не снижают высокой оценки работы и значимости полученных результатов.

Проведенный анализ диссертационной работы Заболотского Андрея Васильевича позволяет сделать вывод о том, что разработанные модели материалов и их разрушения позволили автору сформулировать новый подход к анализу причин трещинообразования и прогнозирования ресурса огнеупорных материалов, что является важным научным и практическим достижением в области механики деформируемого твердого тела.

Диссертация А.В. Заболотского «Многоуровневый подход к прогнозу трещинообразования в квазихрупких композиционных материалах в условиях градиента температуры» соответствует требованиям п.п. 9, 10

«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.

Доктор технических наук

По специальности 05.17.11 –

«Технология силикатных и тугоплавких
неметаллических материалов»

профессор кафедры керамики и огнеупоров

РХТУ им. Д.И. Менделеева

Юрков Андрей Львович

Юрков
10.12.2025

Почтовый адрес: 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1

Телефон: + 7 (499) 978-86-60

E-mail: yurkov.a.l@muctr.ru, and-yur@mail.ru

Подпись

Юркова Андрея Львовича заверяю

Главный специалист
Управления по работе с персоналом
О.В. Файкова
10.12.2025

