

## **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.

### **Актуальность работы**

Современное металлургическое производство предполагает применение конструкционных материалов, предназначенных для работы в непосредственном контакте с агрессивными средами – металлическими расплавами и шлаками при высокой (более 1500 °С) температуре. Как правило, в качестве таких материалов используют огнеупоры на основе оксидов, нитридов или карбидов, имеющих соответствующие температуры плавления. По своей структуре огнеупоры являются композиционными материалами, представленными относительно однородной связкой и армирующим каркасом из крупных тугоплавких зерен, что определяет наличие в материале множества поверхностей раздела структурных элементов. В процессе эксплуатации огнеупорные материалы подвергаются химическому, механическому и термомеханическому воздействию. Последнее часто приводит к трещинообразованию, провоцирующему проникновение расплава в структуру огнеупоров, возникновению сколов и преждевременному выводу футеровки из эксплуатации. Для металлургических агрегатов сталеплавильного производства (сталеплавильных печей, сталеразливочных ковшей, агрегатов печь-ковш, промежуточных ковшей машин непрерывного литья заготовок и т.п.) наиболее опасным является проход жидкой стали и шлака через трещины и швы футеровки к кожуху, сопровождающийся его локальным проплавлением, приводящий к аварийным ситуациям, значительному материальному ущербу и даже человеческим жертвам. Одним из наиболее

важных ресурсов, используемых в сталеплавильном производстве, являются огнеупорные материалы. Срок службы огнеупоров в агрегатах сталеплавильного производства составляет от нескольких десятков (для сталеразливочных ковшей) до нескольких тысяч (кислородные конвертера) плавов и оказывает существенное влияние на ресурсоемкость металлургического производства и себестоимость металлопродукции. При этом затраты на футеровку сталеразливочных ковшей достигают от 30 до 60 % от затрат всего сталеплавильного комплекса на огнеупоры основного состава.

Совершенствование огнеупорных материалов предполагает разработку как более химически стойких компонентов, так и подбор зернового состава для улучшения механических характеристик продукции. Важнейшим этапом проектирования материала является проверка его работоспособности и долговечности в условиях эксплуатации. Промышленный эксперимент является затратным по времени и ресурсам мероприятием, соответственно разработки, позволяющие дать предварительную оценку скорости износа конструкционного материала при эксплуатации, а также выявить наиболее подверженные разрушению зоны оборудования позволяют сокращать объем экспериментальных исследований и формулировать более четкие характеристики продукции в технических заданиях на материалы и конструкции.

Целью диссертации Заболотского А.В. является разработка математического инструментария для оценки, с позиции механики деформируемого твердого тела, ресурса огнеупорных материалов в условиях их высокотемпературной эксплуатации и градиента температурного поля, прогнозирования трещинообразования при термомеханических нагрузках, анализа причин и условий повреждения и разрушения футеровок агрегатов. С учетом потребности современной металлургии в снижении удельных затрат на производство металла, в том числе путем повышения срока службы

оборудования, поставленная задача **актуальна** и имеет большое научно-практическое значение.

### **Структура диссертации**

Диссертация содержит введение, пять глав, заключение, список литературы из 415 наименований и Приложения. Содержание диссертации изложено на 301 странице.

Во *введении* автор формулирует цель и задачи исследования, обосновывает актуальность темы, описывает методическую базу, научную новизну, указывает на теоретическое и практическое значение полученных результатов, представляет положения, выносимые на защиту.

*Первая глава* представляет обзор литературы по теме разрушения композиционных материалов. Автор подчёркивает, что с учётом ограниченных вычислительных ресурсов невозможно напрямую моделировать процессы разрушения квазихрупких композиционных материалов (ККМ) на микроструктурном уровне. В ответ на эту проблему предложен многоуровневый подход, заключающийся в последовательном уточнении зоны локализации дефекта и детализации структуры. Обзор охватывает вопросы стадийности разрушения, влияние структуры на напряжённое состояние, процессы зарождения и развития трещин, а также энергетические и тепловые аспекты разрушения материала. Представленные в главе материалы показывают высокую погруженность автора в проблематику исследования, наличие компетенций критического анализа и системного мышления, умение работать с обширным массивом литературных источников.

Во *второй главе* вводятся основные уравнения, описывающие поведение ККМ, и формулируются две основные модели: модель материала и модель разрушения. В рамках последней вводится новый градиентный деформационный критерий, позволяющий определять область и направление роста трещины на основе анализа напряжённо-деформированного состояния

(НДС). Эффективность критерия подтверждена посредством сопоставления с экспериментальными данными.

*Третья глава* посвящена моделированию структуры и свойств ККМ и огнеупорных материалов. Изучены особенности внутренней структуры таких композитов, проведены численные эксперименты, направленные на исследование взаимного влияния пор и включений. Предложены подходы к оценке влияния взаимного расположения дефектов на трещинообразование. Разработан алгоритм моделирования геометрии максимально напряжённых областей на основе структурирования частиц в пространстве. Для анализа полученных моделей структуры применяется подход, основанный на методе Монте-Карло. Также представлена методика лабораторного определения температурного диапазона применимости модели, основанная на испытаниях, регламентированных ГОСТ 4070-2000 – Определение температуры начала деформации под нагрузкой.

В *четвёртой главе* рассмотрена модель разрушения огнеупора от зарождения микротрещин до критического повреждения материала. Под критическим размером микротрещины понимается такой дефект, рост которого приводит к разрушению конструкции при заданных внешних нагрузках. Таким образом, предложенная модель соответствует временной области разрушения, в которой проявляются квазихрупкие свойства композита. Автор прибегает к экспериментальной проверке своей модели путем физического моделирования испытаний на трёхточечный изгиб и динамическую нагрузку по методике Кольского. Полученные результаты показывают возможность научного обоснования известных фактов с помощью предложенной методики.

*Пятая глава* демонстрирует практическое применение разработанного метода на примерах тепловых агрегатов и литейного оборудования. Приводятся расчёты разрушения футеровки сталеплавильных печей, сталеразливочного ковша и пресс-форм. Показано, как с помощью



предлагаемого подхода можно точно определить область и траекторию разрушения и оценить остаточный срок службы элемента конструкции.

В *заключении* диссертации приводятся выводы и область научно-практической деятельности, в которой могут быть применены полученные результаты.

Разделы диссертации логичны, материал изложен последовательно, для наглядности и визуализации результатов исследований автор использует рисунки и фотографии (91 шт.), текст содержит 12 таблиц.

**Научной новизной** диссертации являются:

1. Разработка и применение многоуровневого подхода к прогнозированию ресурса квазихрупких композиционных материалов в условиях трещинообразования под действием механических и термомеханических нагрузок, основанного на различиях характера разрушения композиционного материала в целом и его составляющих.

2. Установление температурных интервалов хрупкого разрушения и пластической деформации огнеупоров.

3. Разработка градиентного деформационного критерия разрушения для композиционных материалов, с помощью которого на основе анализа статических или квазистатических полей упругих деформаций можно фиксировать момент времени начала роста трещины в материале, ее локализацию, направление распространения и приращение размера за цикл приложения нагрузки.

4. Создание модели квазихрупких композиционных материалов, позволяющей определять геометрические параметры концентраторов напряжений в матрице на основании зернового состава шихты материала и условий его термообработки, учитывающей температурные зависимости свойств материала.

5. Разработка модели разрушения квазихрупких композиционных материалов, позволяющей проводить численные исследования динамики

роста трещин в огнеупорах. Модель объясняет влияние скорости приложения нагрузки на характер разрушения квазихрупких композиционных материалов. С ее применением определены критические значения скорости нагружения, при которых меняется траектория роста трещин и характер разрушения. В целях прогнозирования дальнейшего роста трещины выполнено численное моделирование полей напряжений и деформаций в окрестности ее вершины вблизи границы раздела фаз.

Аналогичные подходы ранее не применялись для анализа разрушения конструкций из огнеупорных материалов. Соответственно, автор обоснованно заявляет их в качестве научной новизны своего исследования.

**Достоверность** результатов работы и положений, вынесенных на защиту, обеспечена применением широко распространенных и стандартных методов выполнения экспериментов и численного моделирования.

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертации, являются аргументированными, логически связанными, в полной мере соответствуют содержанию цели и задач диссертационного исследования.

### **Соответствие диссертации выбранной научной специальности**

Тема диссертации, цели, задачи, предметная область, направления, методология исследования и полученные результаты **соответствуют** паспорту научной специальности: 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Автореферат содержит все основные положения и результаты диссертации, его содержание соответствует полному тексту представленной работы.

Материалы диссертации достаточно полно опубликованы в 36 статьях (из них 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 11 статей в зарубежных или переводных изданиях, включенных в базы данных Scopus и

Web of Science), доложены и обсуждены на научных конференциях различного уровня.

### **Вопросы и замечания по диссертации**

По диссертации имеются следующие вопросы и замечания.

По оформлению:

1. При описании величин (параметров, переменных), входящих в формулы, во многих случаях не указаны их размерности (например в главе 1). Присутствуют повторы описания одних и тех же обозначений величин в формулах (например,  $c$  – теплоемкость стр. 34 формула (1) и стр. 54 формула (16)).
2. Различный стиль оформления формул (например, в формуле (72) на стр. 180 при написании дроби используется конструктор формул, далее в выражении (73) (стр. 181) применяется символ «косая черта», а в выражении (75) на той же странице – отрицательный показатель степени (-1).
3. В содержании стр. 5 и на стр. 195 п.5.2.1, стр. 198 п.5.4.2, стр. 209 п.5.4.3 стр. 211 п.5.4.3, стр. 213 п.5.2.4 нарушена нумерация пунктов.

По существу:

4. Стр. 210, 6 строчка снизу, термин «предплавления» требует пояснения.
5. По материалам п.5.4.2 стр. 198, п.5.4.3. стр. 209., п.5.6.1 стр.224. В процессе эксплуатации футеровки сталеразливочных ковшей происходит износ рабочего слоя, сопровождающийся изменением толщины огнеупора, деградацией структурно-фазового состава огнеупора (обезуглероживание, пропитка расплавами металла и шлака), а соответственно изменением теплофизических и термомеханических свойств поверхностных слоев огнеупора. При транспортировке ковшей с расплавом возможно возникновение деформации кожуха (так называемой «эллипсности»). Эти факторы

логично учитывать при математическом моделировании напряженного состояния огнеупоров футеровки.

6. В тексте диссертации отсутствуют количественные оценки точности или погрешности расчётов (доверительные интервалы на графиках) параметров с применением разработанных автором математических моделей.
7. Проявление пластических деформаций в огнеупорах при температуре, близкой к температуре плавления индивидуальных фаз автор связывает с эффектом Гиббса-Томсона – то есть с физическими процессами появления жидкой фазы. Однако, в многокомпонентных системах аналогичные эффекты могут вызываться, в том числе химическими причинами при образовании легкоплавких соединений.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки выполненной диссертационной работы и носят рекомендательный характер.

Результаты диссертации Заболотского А.В. имеют широкую область практического применения и потенциал к развитию. Разработанный инструментарий (математические модели) рекомендуются для проведения исследований в области термомеханического разрушения квазихрупких огнеупорных материалов, совершенствования структуры и свойств огнеупоров, конструкций футеровки тепловых агрегатов, температурных и тепловых режимов их сушки и разогрева, прогнозирования ресурса и срока службы огнеупоров в различных условиях эксплуатации.

Считаю, что диссертационная работа Заболотского Андрея Васильевича «Многоуровневый подход к прогнозу трещинообразования в квазихрупких композиционных материалах в условиях градиента температуры» является полной и завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Они имеют существенное значение для развития теоретических аспектов, методов моделирования и



прогнозирования разрушения квазихрупких композиционных материалов в условиях механических и термомеханических воздействий. Диссертация посвящена актуальной теме и соответствует требованиям пунктов 9 – 11, 13, 14 «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ. Заболотский А.В. заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Официальный оппонент

Проректор по реализации стратегического проекта, профессор, профессор кафедры теплоэнергетики и экологии ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» Темлянец Михаил Викторович, 8-903-941-66-25



Темлянец Михаил  
Викторович

Ученая степень: доктор технических наук по специальности 05.16.02 - «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

РФ, 654007, Кемеровская область - Кузбасс,  
г. Новокузнецк, Центральный р-н,  
ул. Кирова, зд. 42.  
+7 (3843) 77-79-79  
uchebn\_otdel@sibsiu.ru  
<http://www.sibsiu.ru>



подпись Темлянцева М.В. удостоверяю:  
Начальник отдела кадров



Миронова Татьяна  
Анатольевна

12 января 2026 г.