МАГНЕЗИТ

технологии х разум для созидания

Разработка математической модели термомеханического разрушения огнеупоров

XXII Конференция огнеупорщиков и металлургов, МИСиС, май 2025 г.

А.В. Заболотский, В.Т. Хадыев, М.Ю. Турчин, А.О. Мигашкин

содержание

1 проблема

- Техническая проблема и цель работы
- Основные уравнения физики процесса
- «Западный» подход
- Подход Группы Магнезит

2 модель разрушения огнеупора

- Граница применимости моделей
- Способ определения границы применимости модели хрупкого разрушения
- Усталостное разрушение огнеупоров
- Термомеханическое нагружение льда
- Трехточечный изгиб
- Критическая скорость деформации

3 практическое применение

- Структура решения
- ГУ агрегата
- ГУ изделия
- Распространенные направления трещин
- ГУ структуры
- Благодарности
- Выводы

1 проблема

техническая проблема и цель работы

Условия эксплуатации огнеупора

- Высокая температура эксплуатации – более 1700 °C
- Циклические колебания температуры
- Градиент температуры
- Механическая нагрузка

Структура огнеупора

- Многоуровневая
- Наличие множественных дефектов

Свойства огнеупора

- Выраженная температурная зависимость свойств материалов

Цель работы:

разработка и валидация комплексного многоуровневого подхода к анализу разрушения огнеупоров, учитывающего особенности механических свойств и структуры огнеупора при условиях высокотемпературной эксплуатации и градиента температурного поля для анализа причин разрушения конструкций и прогнозированию их ресурса в известных или заданных условиях службы.

основные уравнения физики процесса

Процесс термомеханического разрушения огнеупоров описывается системой дифференциальных уравнений теплообмена и упруго-пластических деформаций

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho c} div(\lambda\, grad\, T) + \frac{q}{\rho c}$$

Теплообмен

$$\varepsilon_{ij}^{t} = \delta_{ij} \alpha \Delta T$$

Тепловое расширение

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu}\varepsilon_{ij}^{e} + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}\varepsilon_{kk}^{e}\delta_{ij} - \frac{E}{1-2\nu}\varepsilon_{ij}^{t}\delta_{ij}$$

Механические напряжения

$$u_i = f(x_i)$$

Граничные условия

западный подход

Один из способов решения проблемы – описание поведения огнеупора уравнением на основе экспериментальных данных

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu}\varepsilon_{ij}^{e} + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}\varepsilon_{kk}^{e}\delta_{ij} - \frac{E}{1-2\nu}\varepsilon_{ij}^{t}\delta_{ij}$$

$$\frac{d\varepsilon_{cr}}{d\tau} = K(T)\sigma^{n}\varepsilon_{cr}^{a}$$

Данный подход используется у специалистов по моделированию в западноевропейских компаниях:

- определение коэффициентов уравнения выполняется экспериментально;
- полученные коэффициенты справедливы только для материала, который испытывался;
- это эмпирическая модель.

подход Группы Магнезит

Альтернативный способ – разработка модели взаимодействия между компонентами материала при внешнем воздействии

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu}\varepsilon_{ij}^{e} + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}\varepsilon_{kk}^{e}\delta_{ij} - \frac{E}{1-2\nu}\varepsilon_{ij}^{t}\delta_{ij}$$

$$\begin{cases} d\varepsilon_{phase}^{p} \approx 0 \\ d\varepsilon_{material}^{p} \neq 0 \end{cases} \qquad U = \frac{1}{2}\sigma_{ij}\,\varepsilon_{ij}^{e} \qquad \sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu}\varepsilon_{ij}^{e}$$

$$d\vec{l} = -grad\ \varepsilon_1 \cdot f\left(\frac{dU}{\gamma}\right)$$

Данный подход разрабатывается Группой Магнезит:

- Определяются упруго-пластические характеристики компонентов шихты
- Полученные данные позволяют комбинировать различные сочетания составов
- Многоуровневый подход позволяет использовать относительно простые механические модели
- Кроме факта разрушения модель позволяет прогнозировать его динамику
- Это физическая модель

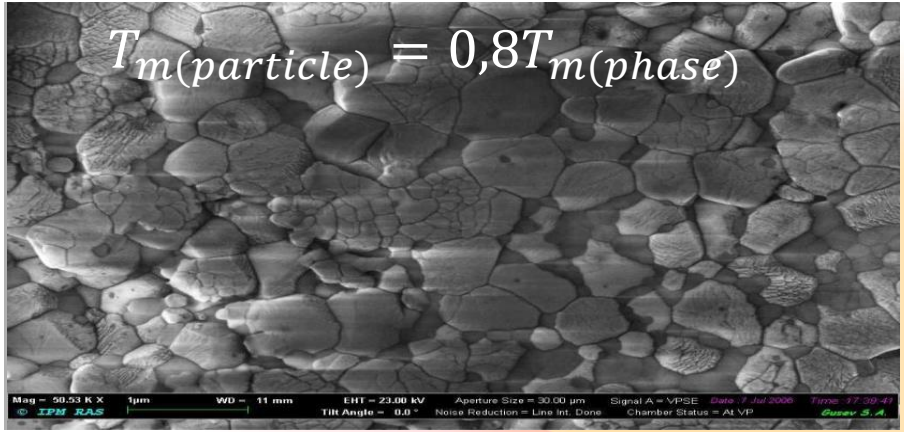
2

модель разрушения огнеупора

граница применимости моделей

Причина изменения упругих свойств – появление жидкой фазы на границах зерен.

Фото из свободных источников. https://studfile.net/preview/14964329/

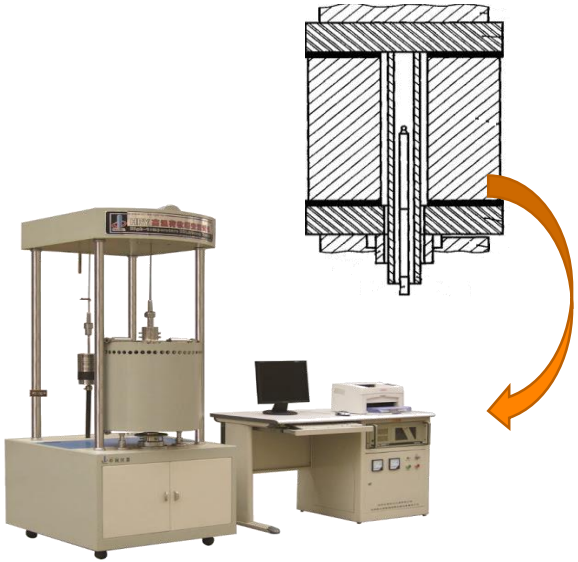


Типичные свойства огнеупоров

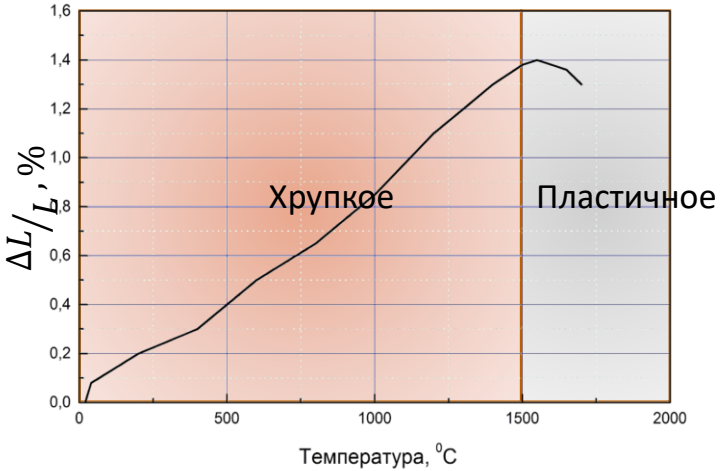
Свойство	Ед.изм.	Значение до 1450 ºС	Значение свыше 1450 ºС
Модуль упругости	ГПа	30	0,8
Коэффициент Пуассона	-	0,15	0,4
Теплоемкость	Дж кг$^{-1}$ К$^{-1}$	1000	1000
Теплопроводность	Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$	5	4
Критическая упругая деформация	Мм/мм	3 ÷ 5 * 10^{-3}	-
Прочность при растяжении	МПа	8	3
Прочность при сжатии	МПа	40	15
Температура начала деформации под нагрузкой по ГОСТ 4070-2014	°С	1350 ÷ 1550	

способ определения границы применимости модели хрупкого тела

Границы применения модели хрупкого разрушения могут быть определены в рамках стандартных испытаний огнеупоров в лаборатории.



Относительное удлинение материала при определении температуры начала деформации под нагрузкой по ГОСТ 4070-2000

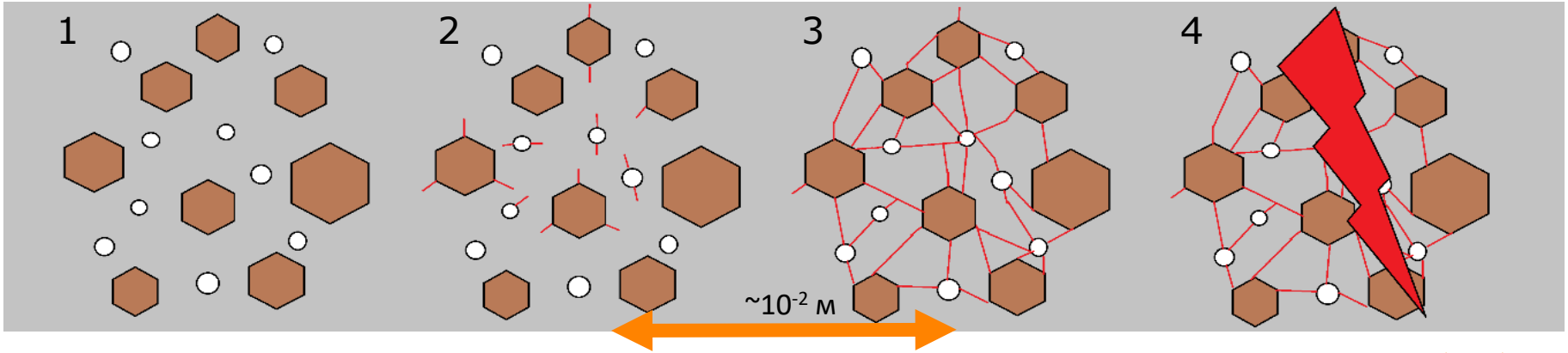


усталостное разрушение огнеупора

Усталостное разрушение – причина длительной эксплуатации огнеупора.

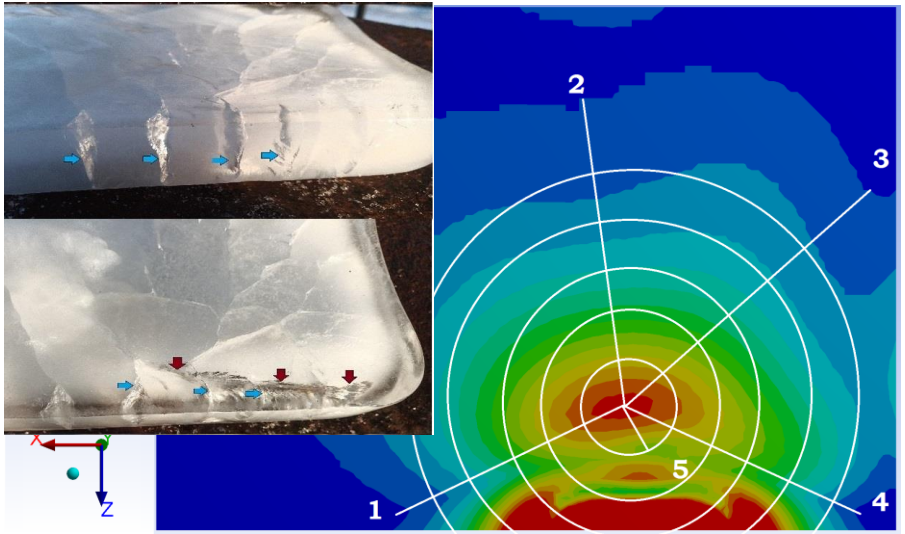
Этапы развития трещины при квази-хрупком или усталостном разрушении огнеупорного материала:

1 – трещины отсутствуют (исходное состояние),
2 – появление микротрещин на концентраторах напряжений,
3 – образование трещиноватой структуры на участке материала (докритический рост трещин),
4 – рост катастрофической (разрушающей трещины).



термомеханическое нагружение льда

Предложенная модель эффективно описывает квазихрупкое разрушение различных материалов.



Градиент упругих деформаций по направлениям, м$^{-1}$

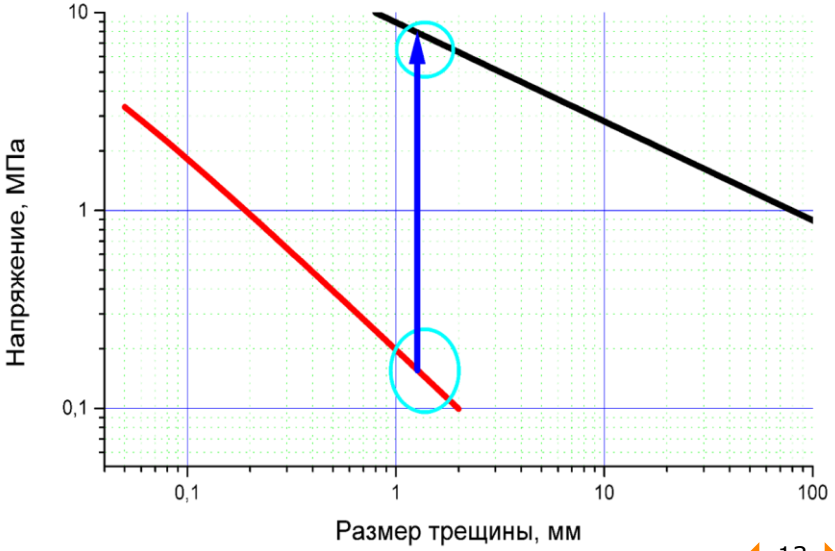
Измерение	Номер направления				
	1	2	3	4	5
1	0.78	1.36	1.05	0.94	1.57
2	0.59	0.42	0.39	0.99	1.58
3	0.42	0.84	0.78	0.93	1.05
4	0.41	0.19	0.21	0.81	0.99
Среднее	0.55	0.70	0.61	0.92	1.30

трехточечный изгиб

Предложенная модель объясняет результаты лабораторных испытаний материалов.

Моделирование испытания огнеупора на предел прочности при трехточечном изгибе было использовано для валидации выбранного сценария разрушения.

Фото А.С. Буяков ИФПМ СО РАН.

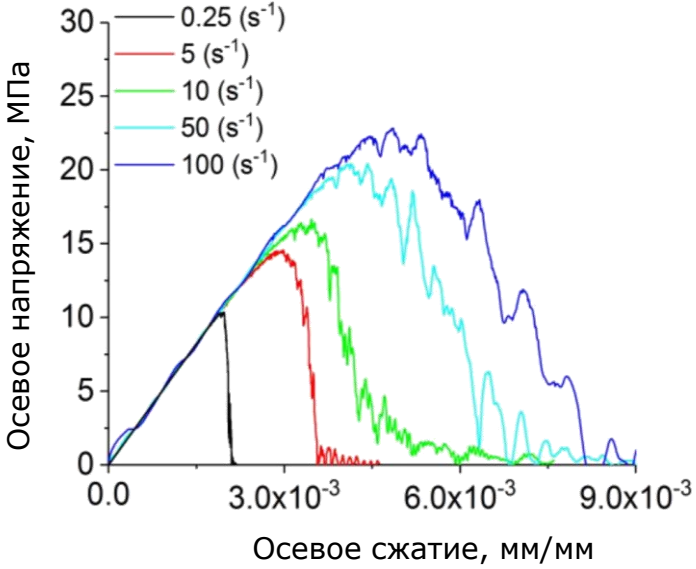


критическая скорость деформации

Предложенная модель объясняет повышение прочности при динамических испытаниях композиционных материалов по методу Кольского.

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

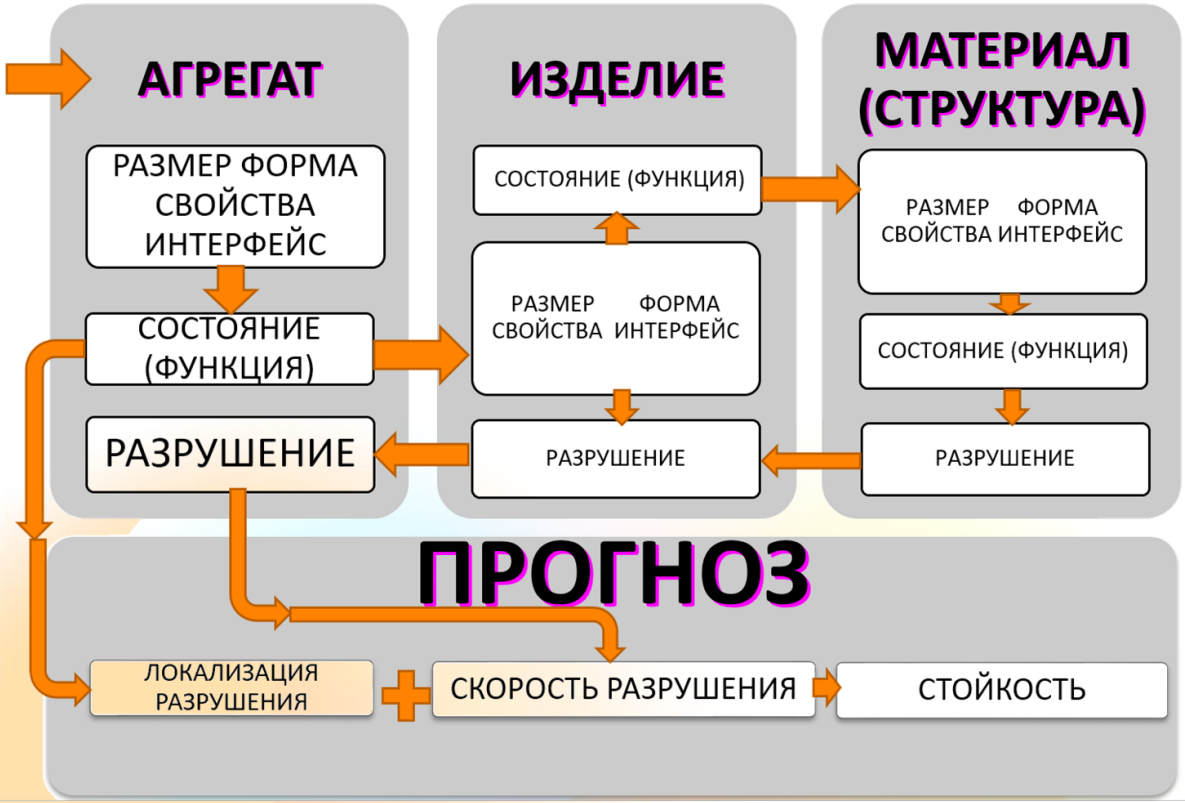
$(\sigma_{cr}^t)_{gr}$	предел прочности при растяжении для зерен
ω_m	скорость звука в матрице
E_m и E_{gr}	модуль упругости матрицы и зерен соответственно
x	координата
k	коэффициент пропорциональности между скоростью звука и скоростью распространения трещины



3 практическое применение

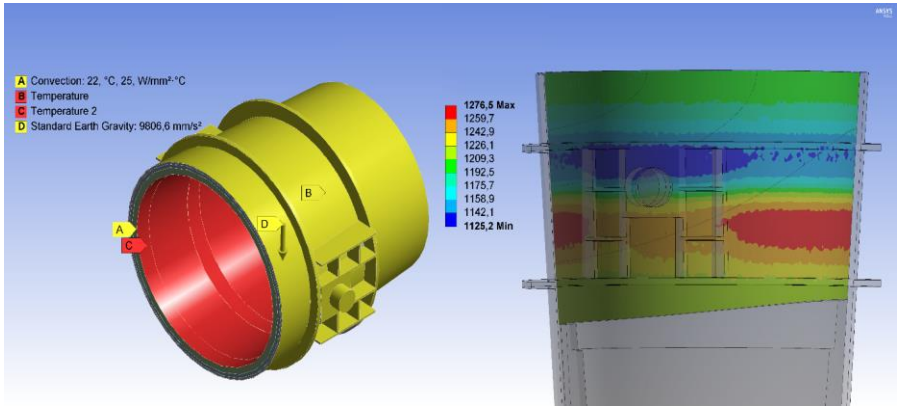
структура решения

Применение многоуровневого подхода к решению практических задач позволяет добиваться значительного сокращения их сложности.



граничные условия агрегата

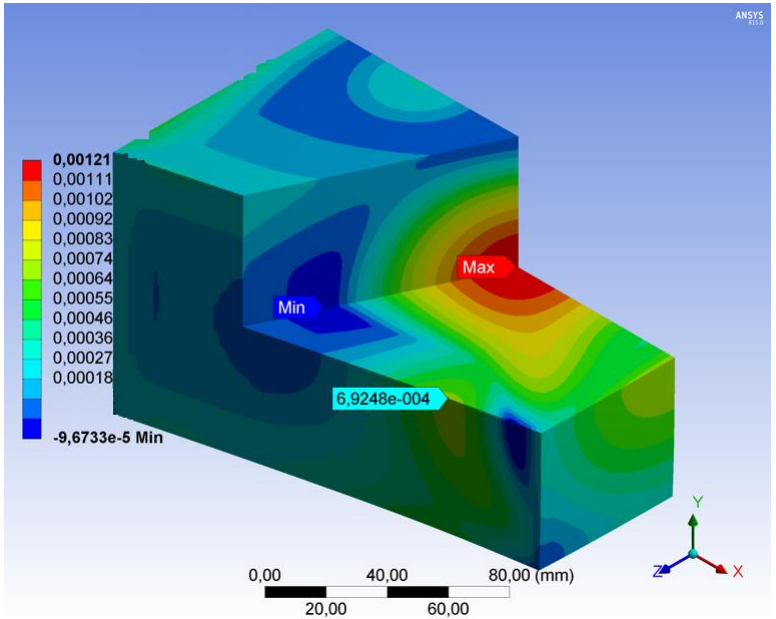
Применение многоуровневого подхода к решению практических задач позволяет упрощать условия задачи по мере перехода между размерными уровнями.

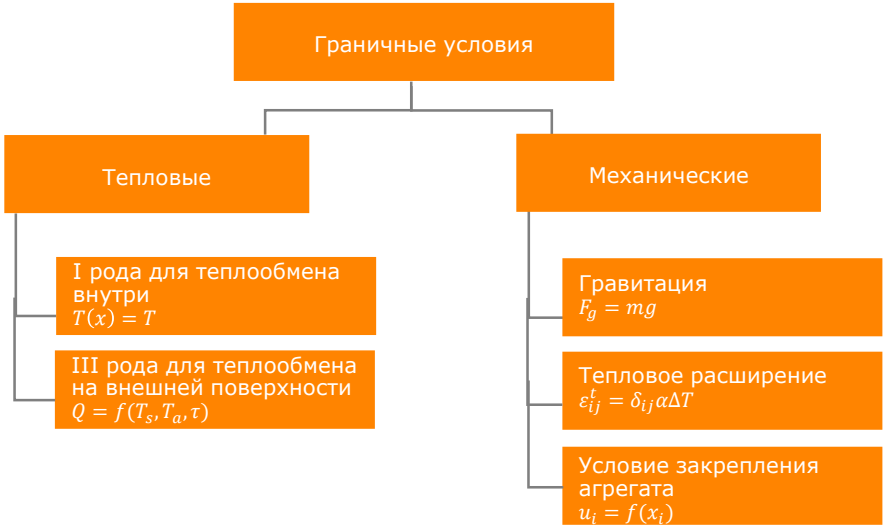


- Граничные условия
  - Тепловые
    - I рода для теплообмена внутри $T(x) = T$
    - III рода для теплообмена на внешней поверхности $Q = f(T_s, T_a, \tau)$
  - Механические
    - Гравитация $F_g = mg$
    - Тепловое расширение $\varepsilon_{ij}^t = \delta_{ij}\alpha\Delta T$
    - Условие закрепления агрегата $u_i = f(x_i)$

граничные условия агрегата

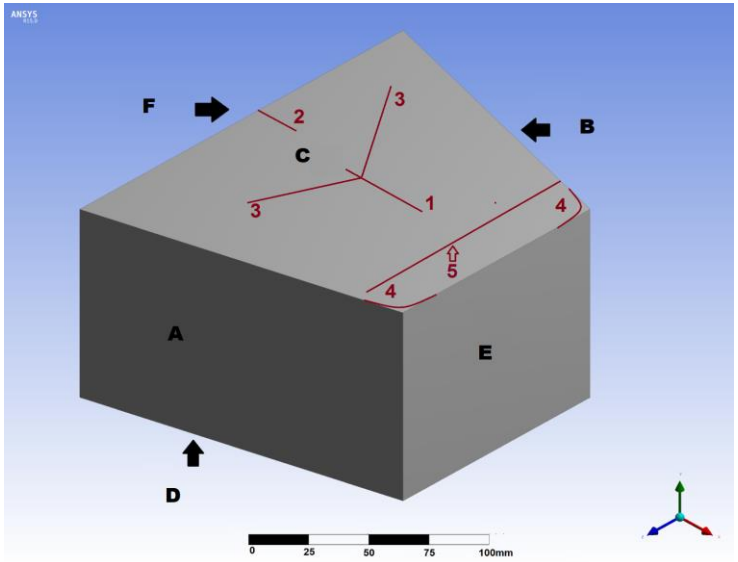
Применение многоуровневого подхода к решению практических задач позволяет упрощать условия задачи по мере перехода между размерными уровнями.





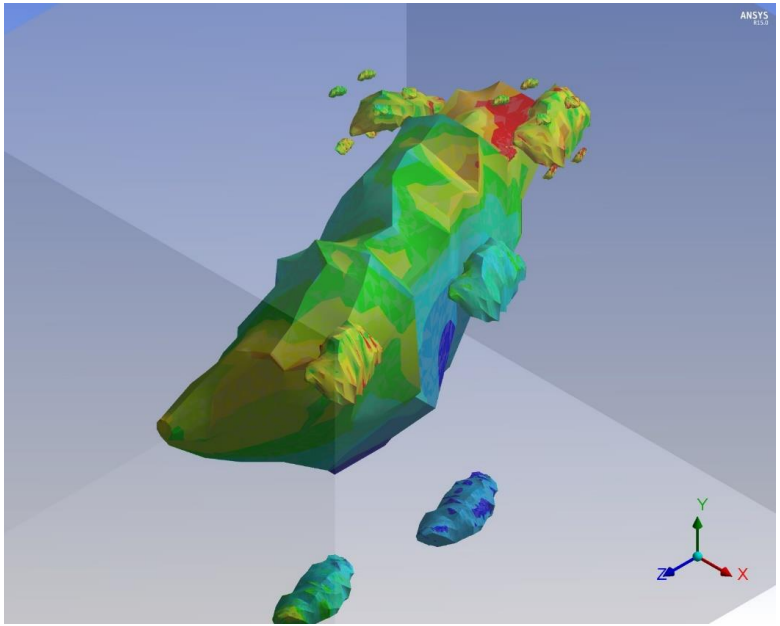
Направления трещин зависят от способа установки изделий в футеровке.

распространенные направления трещин



граничные условия агрегата

Применение многоуровневого подхода к решению практических задач позволяет упрощать условия задачи по мере перехода между размерными уровнями.



- Граничные условия
  - Тепловые
    - I рода для теплообмена внутри $T(x) = T$
    - III рода для теплообмена на внешней поверхности $Q = f(T_s, T_a, \tau)$
  - Механические
    - Гравитация $F_g = mg$
    - Тепловое расширение $\varepsilon_{ij}^t = \delta_{ij}\alpha\Delta T$
    - Условие закрепления агрегата $u_i = f(x_i)$

благодарность

Благодарим за сотрудничество коллег из Института Физики Прочности и Материаловедения Сибирского отделения РАН, г. Томск

ИФПМ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПРОЧНОСТИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

д.ф-м.н. А.И. Дмитриева

м.н.с. А.С. Григорьева

д.ф-м.н. Е.В. Шилько

к.ф-м.н. А.С. Буякова

д.ф-м.н И.Ю. Смолина

д.ф-м.н. А.В. и П.А. Радченко

д.ф-м.н. В.А. Романову

ВЫВОДЫ

- Разработан многоуровневый подход для прогноза термомеханического разрушения огнеупоров
- Определены температурные рамки применения разработанной модели
- Проведена проверка работоспособности моделей на примерах лабораторных испытаний и эксплуатации огнеупоров

спасибо

контакты:

+7 (35161) 4-12-12

azabolotskiy@magnezit.com

сайт Группы Магнезит