

численное исследование разрушения огнеупорных футеровок при термоударе

XX Конференция огнеупорщиков и металлургов
МИСиС, Москва
май 2023

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



1

причины трещин в огнеупорных футеровках

- ▶ механические напряжения
- ▶ роль температуры
 - термоудар при нагреве
 - термоудар при охлаждении
 - напряжения в температурных полях

2

инициация и рост трещин

- ▶ критерии трещинообразования
- ▶ концентрация напряжений
- ▶ виды нагрузок
- ▶ напряжения на системе дефектов
- ▶ остановка трещины
- ▶ критический размер трещины

3

направление роста трещины

- ▶ температурная зависимость свойств материалов
- ▶ прогнозирование направления трещин
- ▶ эксперимент
- ▶ моделирование реальных структур
- ▶ выводы



1

причины трещин в огнеупорных футеровках

причины трещин в
огнеупорных футеровках

роль температуры



Механические напряжения, возникающие при эксплуатации огнеупоров, как правило недостаточны для их разрушения.

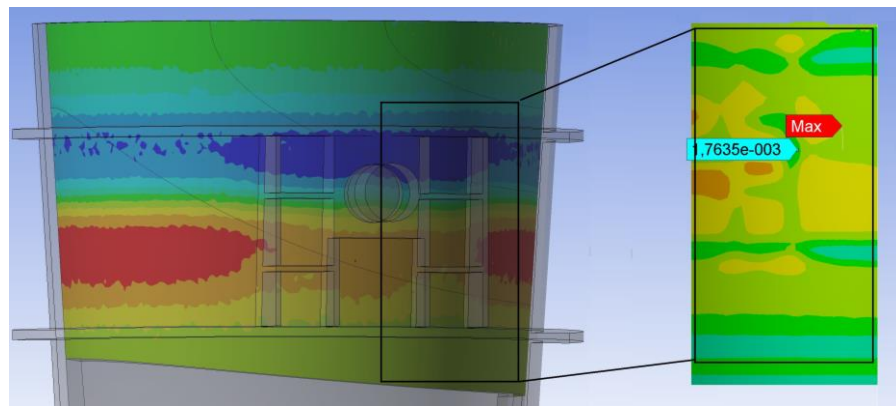
Термомеханические напряжения – основная причина трещинообразования.

причины термомеханического напряжения





напряжения в температурных полях



Поля термомеханических напряжений в футеровках в целом коррелируют с соответствующими температурными полями. Градиентные поля температур приводят к появлению градиентных полей напряжений.

деформационные поля - источник трещин

Наличие тепловых потоков разной интенсивности во внешнюю среду агрегатов (например, на конструктивных элементах кожуха) приводит к формированию градиентных температурных и деформационных полей.

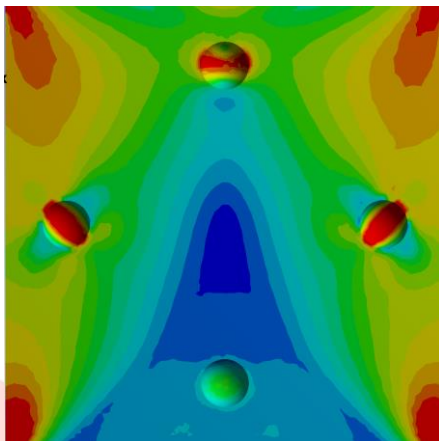
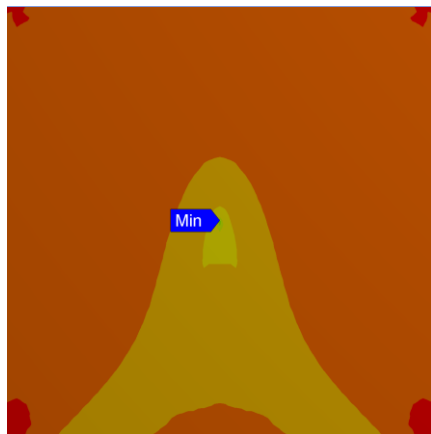


2

инициация и рост трещин

критерии трещинообразования

В рамках механики разрушения было предложено несколько критериев появления трещин, основанных на разных физических явлениях.



численное исследование разрушения огнеупорных футеровок при термоударе

однопараметрические критерии:

- ▶ максимальных главных напряжений;
- ▶ максимальных деформаций;
- ▶ интенсивности напряжений (энергетический критерий).

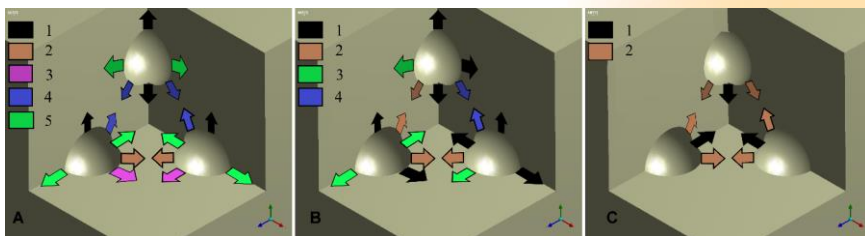
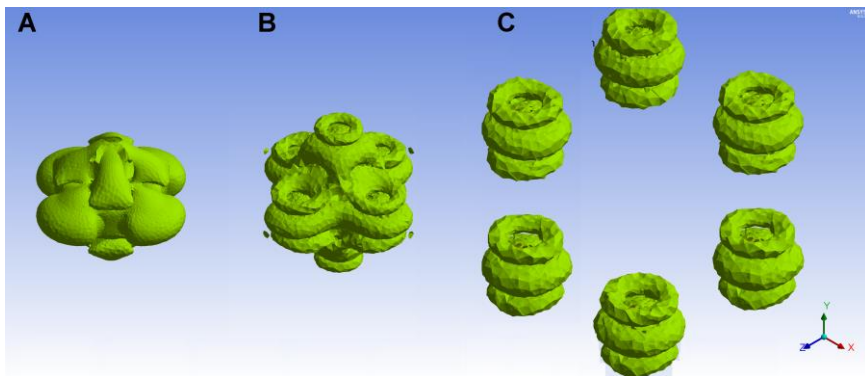
двухпараметрические критерии:

- ▶ Друкера-Прагера-Ранкина;

критерий, разработанный в процессе исследований:

- ▶ градиентный деформационный

напряжения на системе дефектов



Картина напряжений и разрушений на уровне микроструктуры зависит от взаимного положения концентраторов.

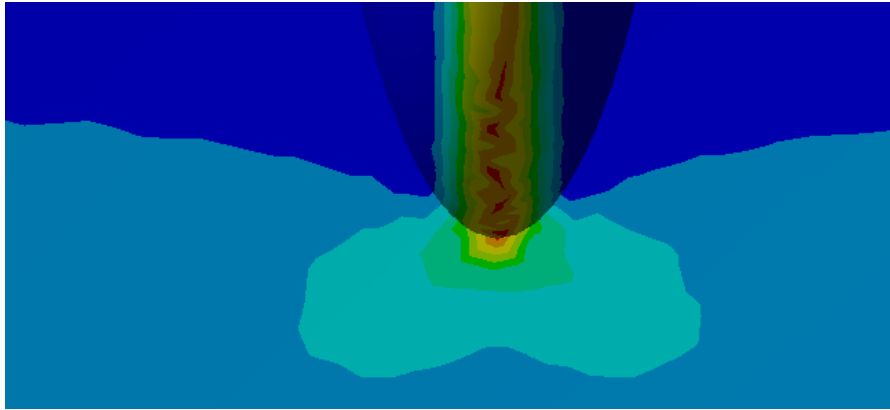
- ▶ большие расстояния между элементами микроструктуры
вокруг каждого элемента формируется индивидуальное поле напряжений
- ▶ малые расстояния между элементами микроструктуры
поля напряжений перекрываются и формируют единое облако

Преимущественное направление трещинообразования при этом может существенно отличаться.

Расстояния между структурными элементами, на которых существенно их взаимное влияние, имеют тот же порядок величины, что и сами элементы. Подтверждается принцип Сен-Венана.

Взаимное влияние например равновеликих пор оказывается существенным при локальной пористости свыше 10 %.

Таким образом, **полученный результат существенен для рассматриваемого класса материалов.**



численное исследование разрушения огнеупорных футеровок при термоударе

остановка трещины

Может ли хрупкая трещина остановиться?
Каков механизм ее роста и остановки?

- ▶ Рост трещины происходит за счет энергии упругой деформации, накопленной в результате того или иного воздействия.
- ▶ При постоянном уровне нагрузки рост хрупких трещин продолжается до границ материала.
- ▶ При импульсном воздействии хрупкие трещины могут останавливаться.
- ▶ Большинство материалов не являются абсолютно хрупкими, соответственно модели хрупкого разрушения имеют ограничения для применения к реальным материалам.

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} V$$



критический размер трещины

При каких условиях микротрещины переходят на макроуровень?

- ▶ Рост трещины происходит до встречи с ближайшим препятствием, например с зерном каркаса.
- ▶ После формирования трещиноватой структуры рост макротрещины рассчитывается в соответствии с вязкостью разрушения материалов.
- ▶ При интенсивном воздействии на материал может произойти разрушение зерен и быстрый рост трещин при нагрузках, меньших предела прочности.

фракция, мкм

4000 – 6000

1000 – 4000

500 – 1000

175 – 500

среднее расстояние, мкм

18 800

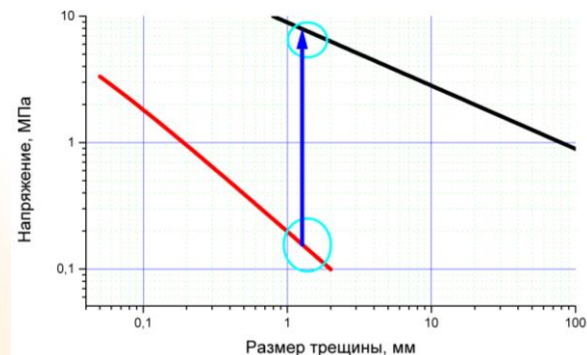
7 800

2 700

1 800

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_p}{(1 + 2 \cdot \frac{1}{B})}$$

$$\sigma_0 = \frac{K_{Ic}}{F(P_1, P_2, \dots, P_n) \cdot \sqrt{pa}}$$



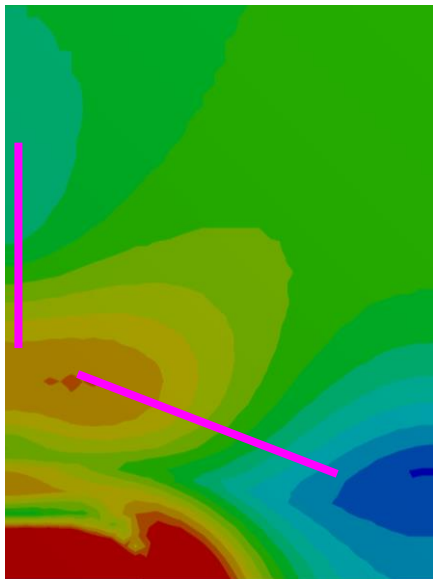


3

направление роста трещины



прогнозирование направления трещин



численное исследование разрушения огнеупорных футеровок при термоударе

Проявление пластических свойств материалами при высокой температуре приводит к изменению возможных траекторий роста трещин.

Учет пластических свойств позволят определить области, где не будет происходить трещинообразования.

Для остальных областей можно вычислить траектории трещин в соответствии с введенным критерием.

Картины разрушения определенные расчетным путем могут быть обнаружены при ремонте футеровок.



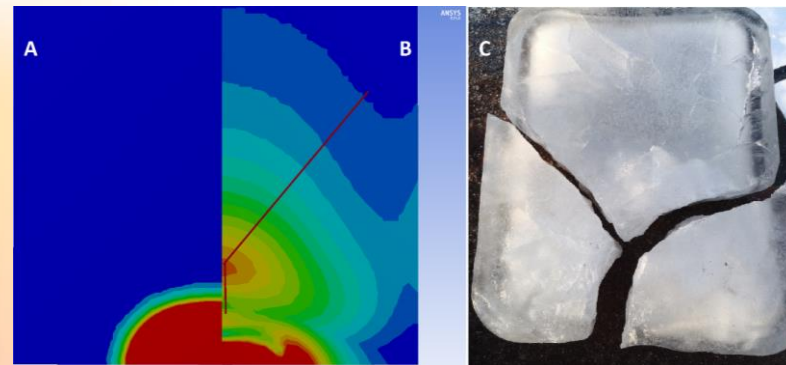
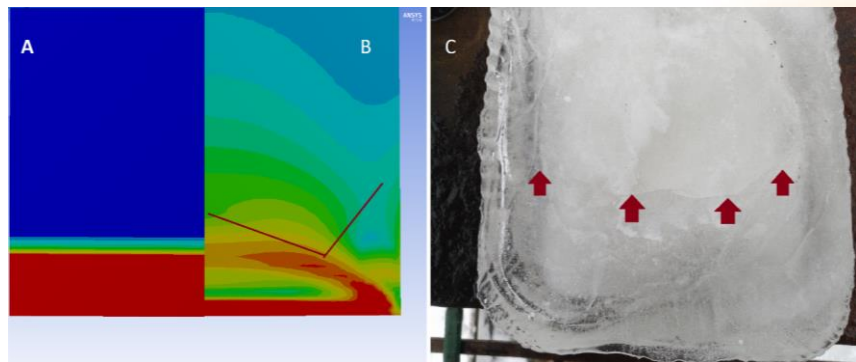
эксперимент

трещинообразование в кусках льда

В качестве экспериментального объекта был выбран пресноводный лед, который при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ проявляет выраженные хрупкие свойства, а при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ утрачивает их.

Проведено более 20 опытов с резким нагревом участка поверхности ледяных образцов. Опыты отличались площадью участка и ограничениями бокового расширения льда.

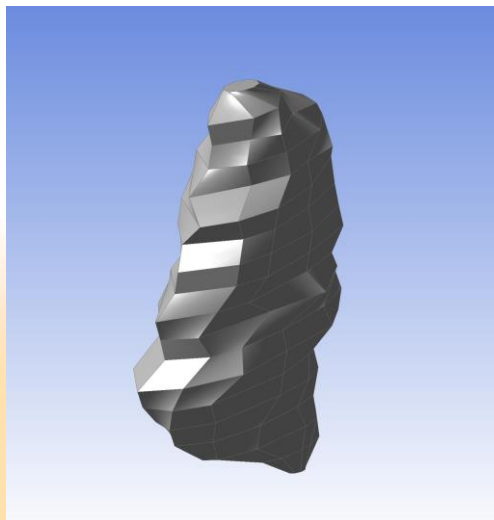
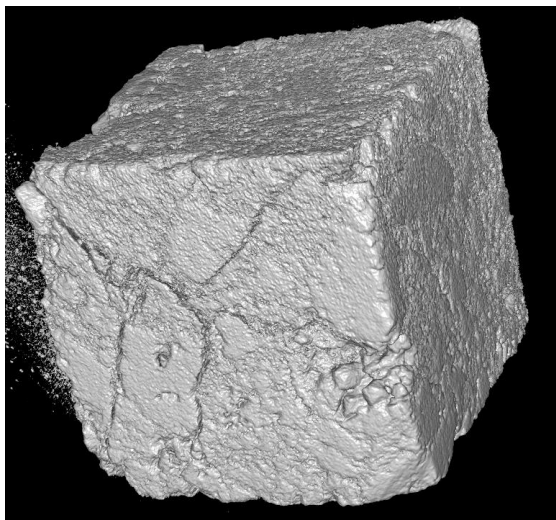
Более 90 % результатов эксперимента совпало с прогнозируемыми направлениями трещинообразования.



направление роста трещины

моделирование реальных структур

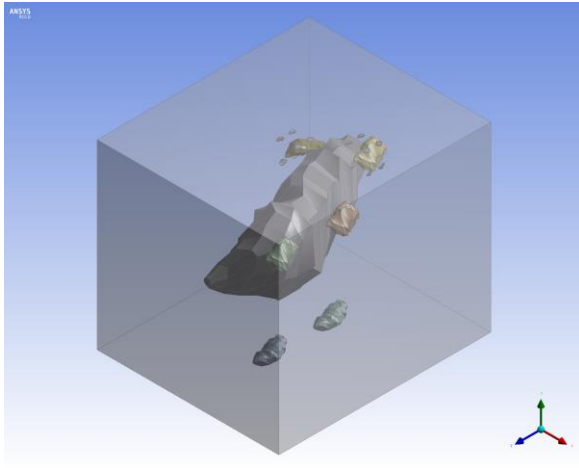
Проведено исследование
реального огнеупорного материала
на рентгеновском томографе по
результатам которого построена
усредненная модель зерна
огнеупора.



направление роста трещины

моделирование реальных структур

Проведено исследование реального огнеупорного материала на рентгеновском томографе по результатам которого построена усредненная модель структуры огнеупора.



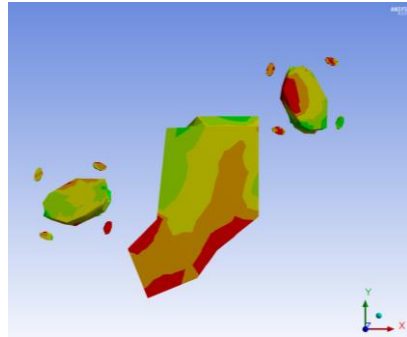
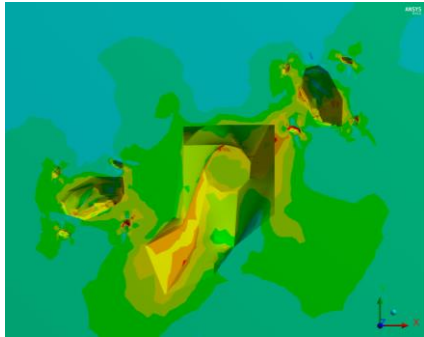
полученная модель отражает:

- ▶ несколько размерных уровней зерен, составляющих каркас огнеупора;
- ▶ различные случаи взаимного расположения элементов структуры;
- ▶ позволяет проводить прочностные расчеты для различных нагрузок за «разумное» время за счет использованных упрощений.

направление роста трещины

моделирование реальных структур

При выполнении прочностных расчетов на модели получены результаты, иллюстрирующие ранние этапы роста трещин



полученные результаты:

- ▶ показывают влияние размерных уровней зерен на напряженно-деформированное состояние в их окрестности;
- ▶ показывают зависимость напряженно-деформированного состояния от «окружения» концентратора напряжений;
- ▶ позволяют прогнозировать места возникновения и направления роста трещин;
- ▶ позволяют проводить оценку ресурса огнеупора на стадии докритического роста трещин;



ВЫВОДЫ

- ▶ Основная причина трещинообразования в огнеупорных футеровках - градиенты или перепады температур.
- ▶ Самый опасный перепад - резкий локальный нагрев или горячий термоудар.
- ▶ Перепады температуры приводят к появлению макроскопических зон напряжений.
- ▶ Макронапряжения мультиплицируются на концентраторах уровня структуры материалов и инициируют рост микротрещин.
- ▶ При достижении критического размера микротрещины, определяемого структурой материала происходит разрушение изделия.
- ▶ Рост докритических микродефектов определяет ресурс всей футеровки.
- ▶ Используя макронапряжения как граничные условия и параметры структуры материалов можно моделировать динамику роста микротрещин, в том числе направление и скорость.



благодарности

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

- ▶ 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.



спасибо

+7 (35161) 4-12-12

azabolotskiy@magnezit.com



[сайт Группы Магнезит](#)