

# Особенности разрушения футеровок в оборудовании разного размера

XIX Конференция огнеупорщиков  
и металлургов, МИСиС  
май 2022 г.

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

А.И. Дмитриев, А.С. Григорьев  
Е.В. Шилько



# 1

проблема и уровни  
её рассмотрения

- ▶ разрушение огнеупоров
- ▶ факторы разрушения
- ▶ уровни рассмотрения
- ▶ методы FEM и DEM

# 2

ранее полученные  
результаты

- ▶ стандартные условия
- ▶ гипотеза
- ▶ FEM моделирование
- ▶ DEM моделирование

# 3

влияние  
размерного фактора

- ▶ микроуровень
- ▶ мезоуровень
- ▶ макроуровень
- ▶ выводы



Проект выполнен совместно  
специалистами  
Инженерного Центра  
Группы Магнезит, г. Сатка  
и Института Физики  
Прочности и  
Материаловедения  
Сибирского отделения РАН,  
г. Томск





# 1

## проблема и уровни её рассмотрения

# разрушение огнеупоров



Особую сложность при минимизации разрушений огнеупоров в службе вызывают предсказание или объяснение локализации трещин в огнеупорных футеровках.



Особенности разрушения футеровок в оборудовании разного размера

## Задача исследований

Имеется объективная необходимость разработки модели разрушения огнеупоров в процессе службы с учетом:

- ▶ Динамики изменения термомеханических характеристик с ростом температуры (в том числе нелинейных характеристик вблизи температур фазовых переходов)
- ▶ Значительных температурных градиентов внутри футеровки
- ▶ Неоднородной структуры применяемых материалов.

# факторы разрушения



Особенности разрушения футеровок в оборудовании разного размера



Причиной разрушения огнеупоров в службе являются разнообразные физические и химические процессы.

## Основные факторы

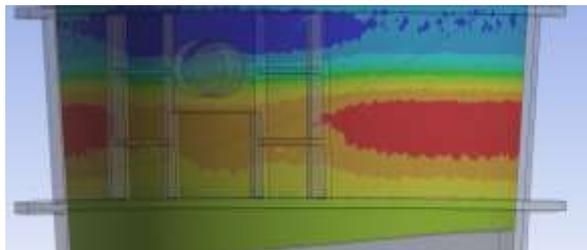
- ▶ Химическое взаимодействие с агрессивными средами (металл, шлак, кислород воздуха)
- ▶ Абразивный износ путем взаимодействия с движущимися конденсированными средами
- ▶ Механическое воздействие (удары в процессе перемещения)
- ▶ Термомеханические воздействия – вследствие резкой смены температуры внутренней среды, например при заливке металла
- ▶ Размерный фактор, приводящий к возникновению суперпозиции полей механических напряжений

# уровни рассмотрения

Картина воздействия факторов на футеровку различна при рассмотрении её с различной степенью детализации.

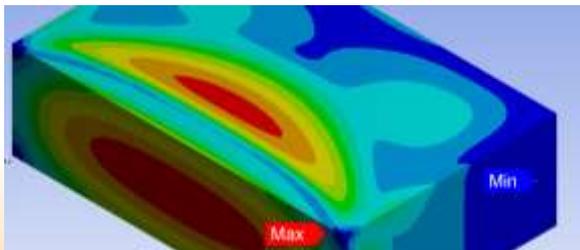


## Макроуровень



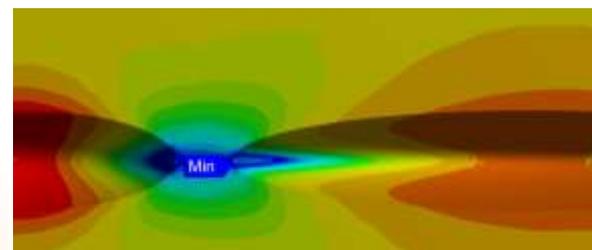
Моделирование проводится для агрегата целиком, при этом выявляются проблемные зоны конструкции для более детального рассмотрения

## Мезоуровень



Соответствует единичному изделию или группе изделий, нагруженных в соответствии с результатами предыдущих расчетов. Дает возможность выявлять динамику развития напряжённого состояния в отдельном кирпиче

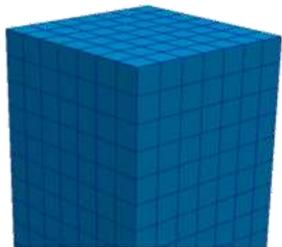
## Микроуровень



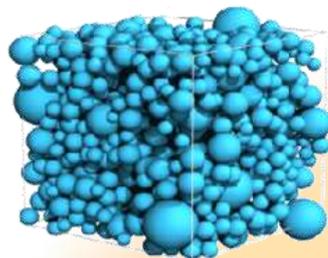
Позволяет моделировать динамику роста микротрещин на уровне структуры материала. Позволяет прогнозировать ресурс изделия.

# МЕТОДЫ FEM и DEM

Вид ячеек для FEM и DEM моделирования



FEM



DEM

В исследовании применялись наиболее распространенные математические методы для моделирования теплопередачи, механических напряжений и разрушения материалов.

## Инструментарий

- ▶ метод конечных элементов (FEM), реализованный в пакете ANSYS Mechanical R15;
- ▶ метод дискретных элементов (DEM "Movable cellular automaton method"\*), разработанный в ИФПМ СО РАН специально для моделирования процессов разрушения материалов.

\* Shilko E.V. et al., Sci. Rep. 8 (2018)  
Psakhie S.G. et al., Eng. Fract. Mech. 130 (2014)





# 2

## ранее полученные результаты

# стандартные условия



В стандартных условиях эксплуатации образуются вертикальные трещины либо сколы, параллельные рабочей поверхности.

Типичная картина трещин в футеровке сталеразливочного ковша



Трещины и сколы могут возникать как при нагреве, так и при остывании футеровки.

Однако, характер напряжений и локализация исходного дефекта будут различны при разных температурных и механических условиях.

Numerical investigation of refractory stress-strain condition under transient thermal load

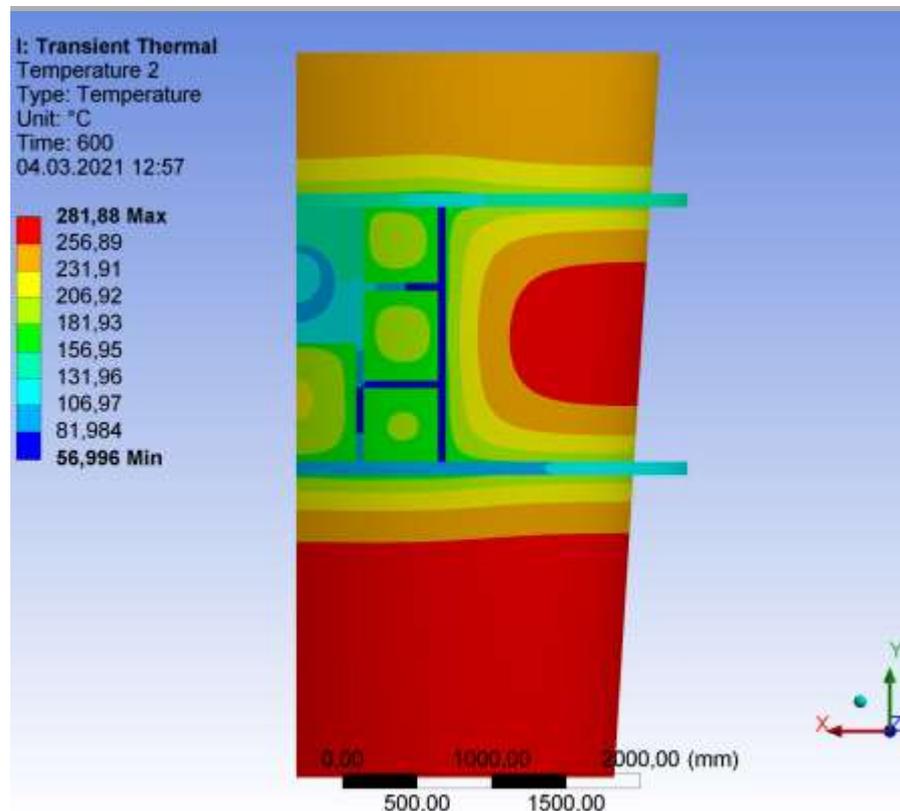
AIP Conference Proceedings 2310, 020355 (2020);  
<https://doi.org/10.1063/5.0034479>

A. V. Zabolotskiy, M. Y. Turchin, V. T. Khadyev, and A. O. Migashkin

## 2. ранее полученные результаты



Температурное поле поверхности кожуха сталеразливочного ковша



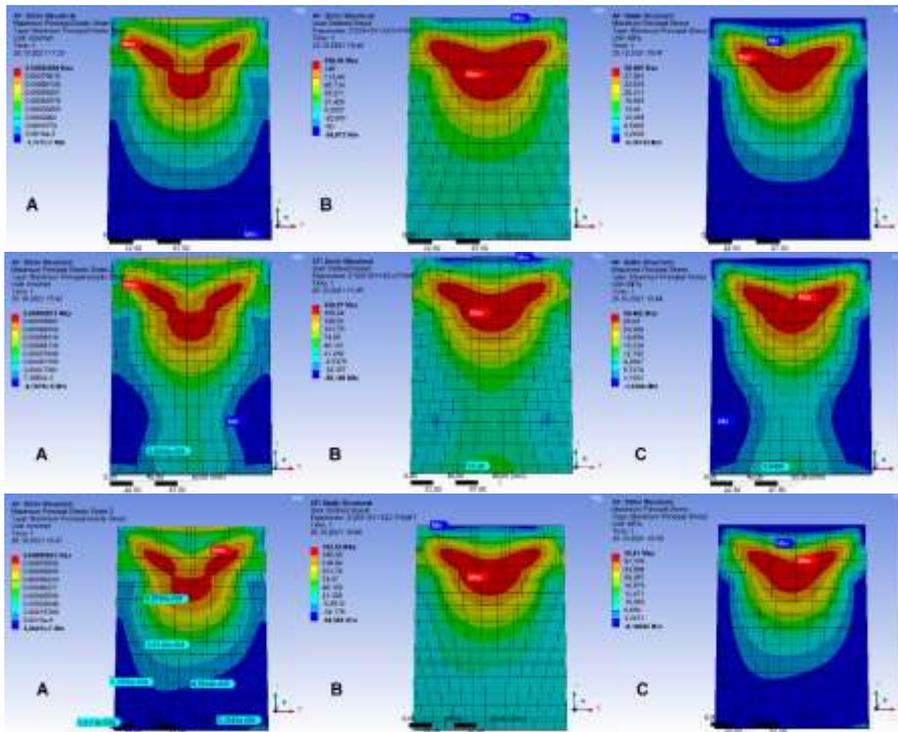
## ГИПОТЕЗА

Существенное влияние на механические и термомеханические напряжения в футеровке оказывают буферный и теплоизоляционный слой.

- ▶ При отсутствии или несжимаемости буферного слоя механические напряжения при взаимодействии арматуры и рабочей футеровки могут приводить к изменению направления развития трещин.
- ▶ При отсутствии или значительном износе теплоизоляции на тыльной стороне рабочей футеровки может возникать значительный градиент температуры, приводящий к развитию дополнительных термомеханических напряжений.



# FEM моделирование



Без градиента температуры и свободной тыльной гранью.

Условия для роста центральной трещины, перпендикулярной рабочей поверхности от рабочей поверхности.

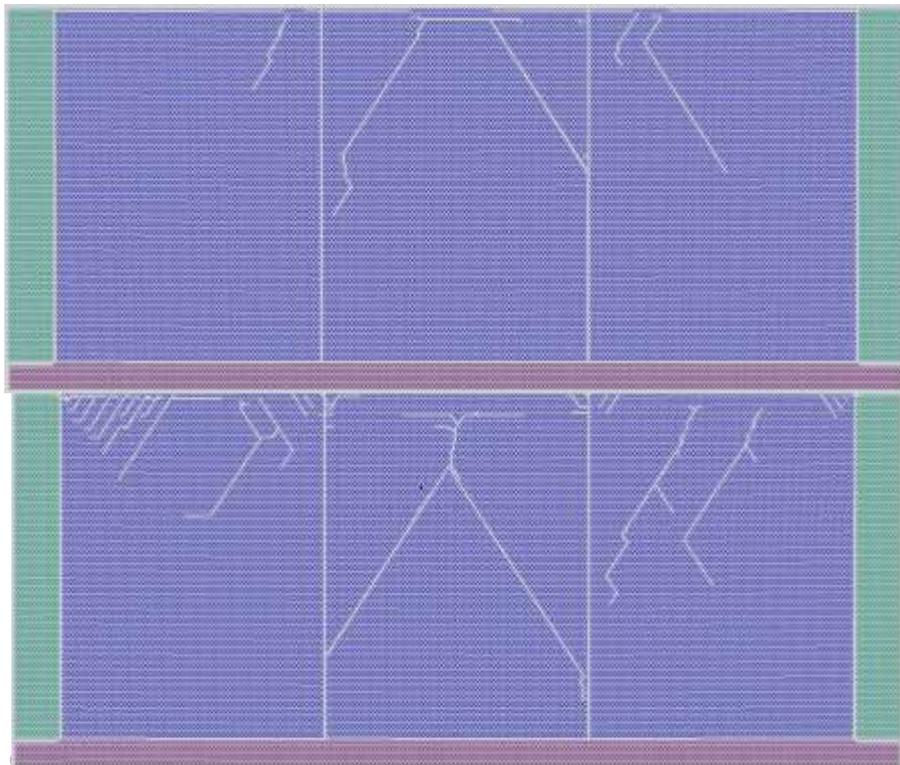
Фиксированная тыльная грань кирпича без градиента температуры.

Условия для роста трещин навстречу друг другу от горячей и холодной граней

При градиенте температуры на свободной тыльной грани кирпича.

Условия для отклонения трещины, согласно критерию градиента деформаций

## DEM моделирование



Картина разрушений зависит от градиента температур на тыльной грани огнеупора.



Без градиента температуры на тыльной грани.

Равновероятное движение трещин к боковым граням подчеркивает отсутствие преимущественного направления для отклонений центральной трещины

С учетом градиента температуры на тыльной грани.

Выраженное преимущественное направление отклонения центральной трещины в сторону одной из боковых граней



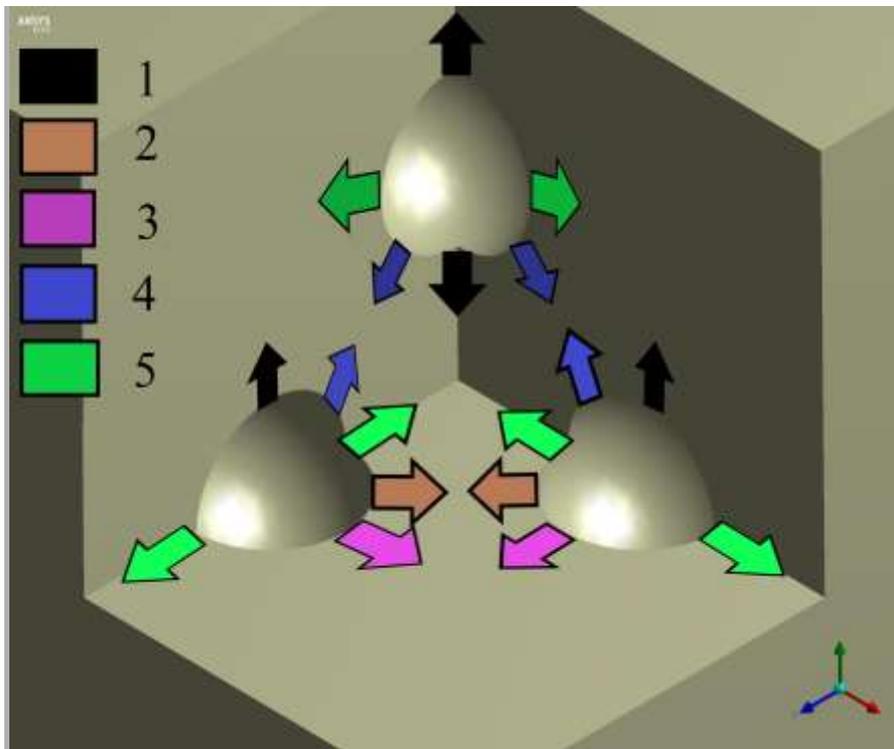
# З

## влияние размерного фактора

### 3. влияние размерного фактора



Варианты направления распространения трещин



## микроуровень

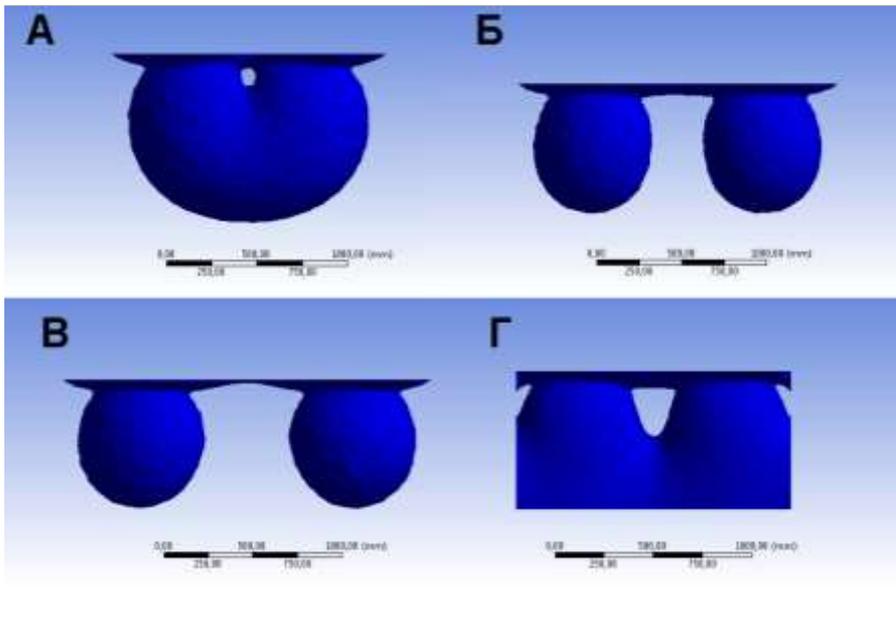
На микроуровне направление роста трещины при одной и той же схеме приложения нагрузки зависит от взаимного расположения элементов структуры.

Методом конечных элементов было исследовано направление роста трещины в зависимости от расстояния между порами в пористом материале.

### 3. влияние размерного фактора



Зависимость размера области напряжений от расстояния между зонами приложения давления



А – В – для массивного (полубесконечного) тела,  
Г – для тела, размер которого соизмерим с напряженной областью.

## мезоуровень

На мезоуровне варьирование расстояния между зонами приложенной нагрузки приводит к различной суперпозиции полей напряжений.

Расстояние между зонами приложения нагрузки

- А – 2 размера зоны;
- Б и Г – 4 размера зоны,
- В – 5 размеров зоны.

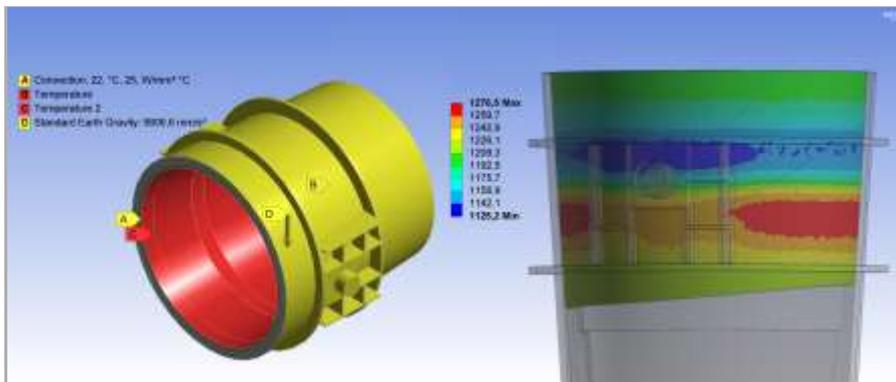
Напряжения внутри обозначенной зоны составляют

**5%** и более от приложенной нагрузки.

### 3. влияние размерного фактора

# макроуровень

## Граничные условия для задачи

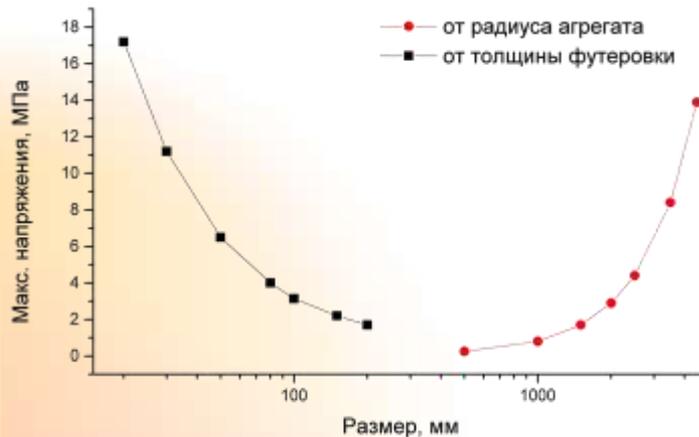


Особенности разрушения футеровок в оборудовании разного размера



На макроуровне напряжения в футеровке при одних и тех же условиях зависят одновременно от её толщины и габаритов агрегата.

Зависимость напряжений от размера изделий и агрегата



### 3. влияние размерного фактора

# макроуровень

Без учета термического расширения

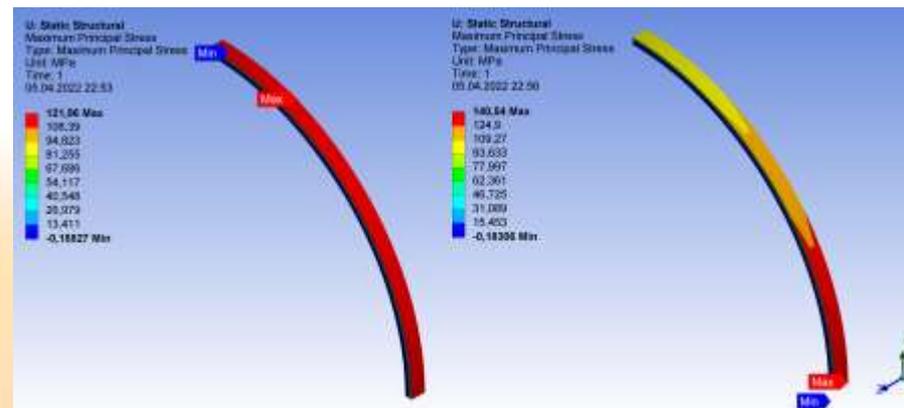


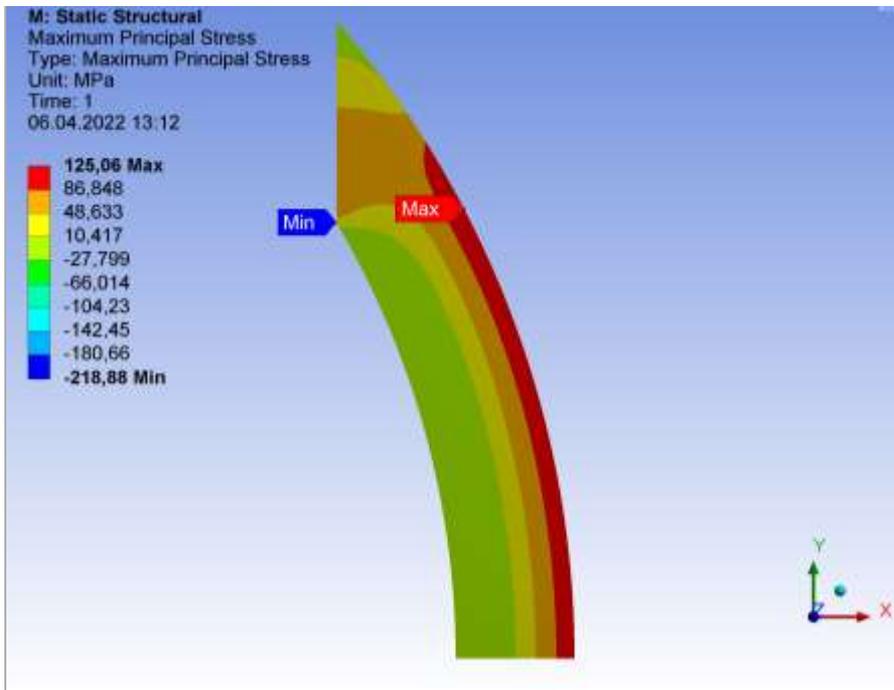
Особенности разрушения футеровки в оборудовании разного размера



При положении ковша «на боку» формируются характерные напряжённые и деформированные участки футеровки.

Для горячей футеровки:  
в вертикальном положении и «на боку»





## макроуровень

При повторном нагреве после провисания футеровки картина напряжений изменяется с формированием новой напряжённой зоны.

Новая напряжённая зона располагается под углом

**30-40** градусов от оси цапф.

Особенностью этой зоны является значительный градиент напряжений, что само по себе является фактором трещинообразования.

### 3. влияние размерного фактора

# макроуровень



Характерная картина трещин различна для агрегатов разного размера.

Малый ковш



Особенности разрушения футеровок в оборудовании разного размера

Большой ковш





Характер разрушения огнеупорных футеровок зависит в том числе от размера оборудования.

## ВЫВОДЫ

На примере сталеразливочных ковшей отмечено, что агрегаты небольшой ёмкости чаще подвержены равномерному или хаотичному распределению трещин по поверхности рабочей футеровки, в то время как крупные агрегаты имеют выраженные участки преимущественного трещинообразования.

К таким участкам относятся зоны проекции цапф и границ их крепления со свободной поверхностью кожуха, в которой иногда наблюдается образование «косых» трещин, и области футеровки, расположенные на линии, перпендикулярной оси цапф.

В оборудовании малого размера разброс напряжений по поверхности футеровки невелик

▶ Таким образом, случайные локальные концентрации напряжений могут привести к зарождению трещин, расположенных без привязки к наиболее напряженным областям футеровки.

Уровень напряжений в характерных зонах агрегатов небольшого размера сравнительно невелик

▶ То есть трещинообразование будет происходить медленнее, чем в крупном оборудовании, что также повышает вероятность трещинообразования в других локациях.

Уровень напряжений на концентраторах в оборудовании большого размера может оказаться на порядок выше по сравнению с небольшими агрегатами

▶ Это приводит к преимущественному формированию характерной картины разрушения.



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



д.ф-м.н. А.И. Дмитриева  
м.н.с. А.С. Григорьева  
д.ф-м.н. Е.В. Шилько

# спасибо

Контакты

+7 (35161) 4-12-12

azabolotskiy@magnezit.com



[сайт Группы Магнезит](#)