

ПРОЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ПЕРИКЛАЗОВЫХ ОГНЕУПОРОВ-КОНСТРУКЦИЙ

А.Х. Акишев¹, С.М. Фоменко¹, С. Толендиулы^{1,2}

¹Институт проблем горения, ул. Богенбай Батыра 172, г. Алматы, Казахстан

²Satbayev University, ул. Сампаева 22а, г. Алматы, Казахстан

Дата поступления:
5 декабря 2019

Принято на печать:
10 января 2020

Доступно онлайн:
19 марта 2020

УДК: 669.04:666.76

АННОТАЦИЯ

Восприятие знакопеременной тепловой нагрузки на реакцию огнеупорного материала обусловлено его фракционным составом, определяющей ее структуру, свойства и параметры изделия. Она формирует дискретность материала с чередующимися плотными спеченными разноразмерными частицами с включениями пор. При воздействии теплового потока огнеупорный материал испытывает силы сопротивления разрушению проявлениями реакций сжатия при температурном его расширении. Фракционный состав материала определяет его термомеханические характеристики и распределение внутренних напряжений при воздействии теплового потока, которые формируют термостойкость огнеупоров-конструкций. Работа посвящена изучению на макро-микроуровне термонапряжений в структуре фракционного состава периклазовых огнеупоров при высоких и низких тепловых потоках и их влияние на термостойкость.

Ключевые слова: тепловой поток, термическое напряжение, структура, периклазовые огнеупоры-конструкции, дискретный материал, фракционный состав, градиент температур, термостойкость.

Введение

Интенсивность и продолжительность теплового воздействия на поверхность огнеупора определяет термонапряженное состояние материала, которое формируется неравномерным распределением теплового потока в структуре изделия, а также теплопроводностью, изменением температурных параметров и термонапряжений в зависимости от фракционного состава и вещественного содержания материала [1, 2].

В работе [3] было показано, что при различных скоростях нагрева (от 3 до 12 °С/мин) происходило разрушение внутренней рабочей поверхности огнеупорных изделий.

Скорость теплового потока влияет на напряженное состояние материала и это значительно сказывается при пороговых его показателях с концентраций внутренних сил на поверхности изделия [4].

Установлено [5], что равномерное распространение скорости теплового потока позволяет увеличить термическую стабильность напряженного состояния огнеупорных материалов.

В работе [6] показан характер распределения температурных полей на рабочей поверхности и гипотетических слоях огнеупора от скорости нагрева материала (5-25 °С/мин). Установлен турбулентный характер течения температурного процесса концентрации напряжений по периметру материала и их снижении на ее рабочей поверхности.

Экспериментальная часть

Для изучения скорости распространения тепловых потоков во внутренних слоях фракционного состава материала разработана методика исследования. На схеме (рис. 1) приведены цилиндрические ячейки диаметром 3 мм, изготовленные в огнеупорном периклазовом материале, вырезанного в виде плиток из торцевой части кирпича 115х65 мм толщиной 20 мм.

Ячейки (рис. 1) заполняли периклазовым порошком фракционного состава 1-0,5 мм (1), менее 0,063 мм (2) и 2-1 мм (3). Для измерения температурных параметров устанавливали термодатчики в исследуемых точках.

*Ответственный автор

E-mail: sanat_tolendiuly@mail.ru (С. Толендиулы).

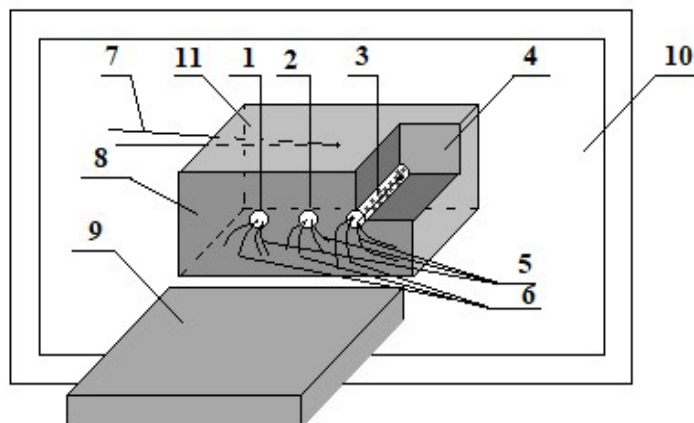


Рис. 1. Схема методики исследования огнеупорных материалов: 1, 2, 3 – ячейки с материалом фракции 1-0,5 мм; 0,063 мм; 2-1 мм; 4 – разрез исследуемого кирпича; 5 – термопара, установленная во фракционированном составе материала в 5 мм от торца исследуемого кирпича; 6 – термопара, установленная на расстоянии 20 мм от торца; 7 – термопара, установленная на торце исследуемого кирпича; 8 – исследуемый материал (обратная сторона); 9 – поверхность кирпича для крепления исследуемого материала; 10 – горловина печи; 11 – торец исследуемого материала

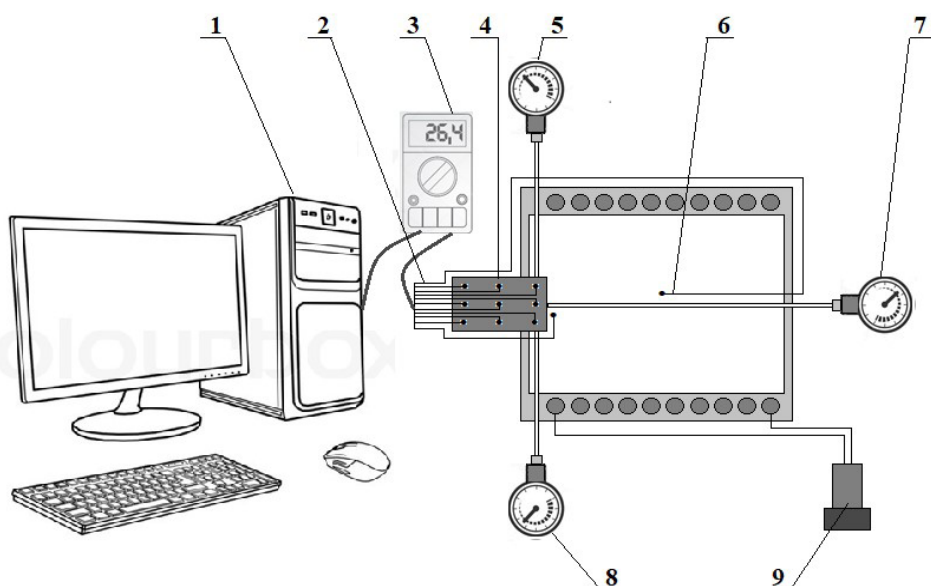


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для проведения микро-, макро исследований в огнеупорных материалах до 1500 °C при различных температурных режимах: 1 – компьютерный комплекс, 2, 6 – термодатчики, 3 – мультиметр; 4 – исследуемый блок материала; 5, 7, 8 – индикаторы для измерения изменений параметров огнеупоров; 9 – трансформатор.

Следуя рисунку 1 изготовленный блок (8) плотно закрепляли на торце периклазового кирпича (9) и теплоизолировали. При проведении экспериментов установленный блок нагревали вместе с печью или предварительно разогревали печь до заданной температуры 500, 700, 900 и 1050 °C, а затем вставляли в нее подготовленный блок, теплоизолируя систему от потери тепла в окружающую среду. Выдерживали исследуемый блок в течение заданного времени, регистрируя распределение температуры во внутренних слоях материала ячеек. Общая схема экспериментальной установки для микро-, макро-

исследований температурных напряжений огнеупорных изделий представлена на рисунке 2.

Известно, что изготовление периклазовых огнеупорных материалов основывается на технологии, при которой шихта формируется из зернистого и тонкомолотого термообработанного магнезита заданного фракционного состава. После прессования материал получает удобно укладываемую плотную текстуру с наименьшей пористостью. Обожженный огнеупор имеет дискретную пористую структуру, состоящую из спеченных контактирующих зерен различного размера от 2 до 60 микрон и менее.

При воздействии температуры на кирпичную кладку, огнеупорный материал имея разнотелый фракционный состав приобретает разнотелые тепловые потоки ввиду изменения и различия в теплофизических микрохарактеристиках, составляющих элементов структуры кирпича. Теоретически группы крупных и средних зерен имеют одну характеристику тепловых свойств, тонкомолотая фракция ($< 0,063$ мм) – другую, а контакты тонких перемычек должны иметь уже значительные отличия по температурным параметрам.

Результаты и обсуждение

Целью исследования является изучение скорости распространения тепловых потоков в периклазовом огнеупоре, состоящего из предельных фракционных составов: 2-1 мм; 1-0,5 мм и менее 0,063 мм. Методика проведения и схема установки приведена на рисунках 1 и 2.

Изделия с впрыснутыми в ячейки заданных периклазовых фракционных составов (2-1, 1-0,5 и менее 0,063 мм) и установленными в них термопарами закрепляли в горловине предварительно разогретой печи (или вместе с печью) до температур 500, 700, 900 и 1050 °C. Контрольные точки располагались на торцевой части кирпича и на исследуемых слоях от торца 5, 10, 15 и 20 мм. Полученные в результате экспериментов температурные кривые, которые приведены на рисунке 3 в сокращенном варианте, характеризуются плавными измерениями температуры в зависимости от глубины залегания термопар (5-20 мм) и зернового состава шихты. На основании полученных температурных кривых проведены расчеты удельных тепловых потоков и температурных напряжений от времени и глубины течения процесса.

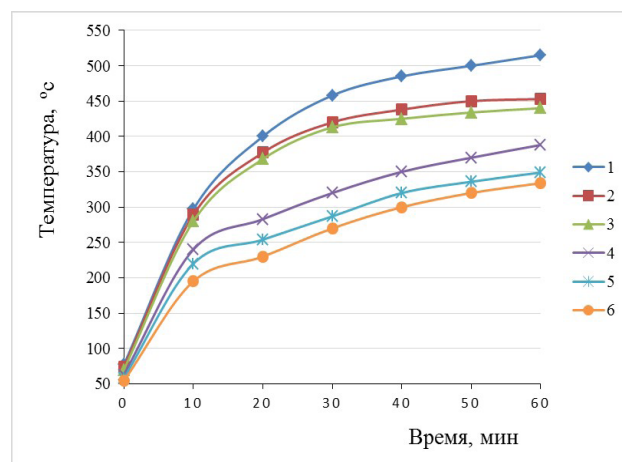
В результате исследования (рис. 4) было установлено, что с повышением температуры изделия (500, 700, 900 и 1050 °C) удельный тепловой поток снижается (на примере зерен 2-1 мм) при 20-ти минутной экспозиции с $35,5 \cdot 10^4$ (500 °C) до $18,7 \cdot 10^4$ Вт/м² (1050 °C), а при 60-ти минутной – соответственно с $30,2 \cdot 10^4$ до $1,7 \cdot 10^4$ Вт/м². Однако, напротив, температурные напряжения повышаются – с 337 (500 °C) до 416 МПа (1050 °C) и с течением времени процесса увеличиваются практически в два раза с 240 до 405 МПа.

Рассматривая отличия в распределении энергии (q и σ) от размера зерен фракционного состава, можно отметить, что наибольшие значения этих показателей наблюдаются при зернах размером 2-1 мм. Тонкодисперсные зерна (менее 0,063 мм) занимают средние показатели между 2-1 и 1-0,5 мм (при 500 и 700 °C), а затем кривая резко снижается при повышении температуры до 900-1050 °C (рис. 4).

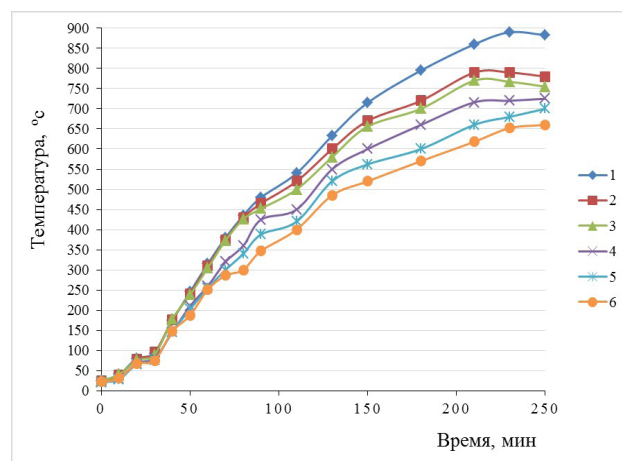
Исследуя температурные напряжения фракционных составов, было установлено: для крупных зерен 2-1 мм – 380,5 МПа; для мелких зерен менее 0,063 мм – 345,5 МПа; для средних зерен 1-0,5 мм – 286,5 МПа.

Из этого следует, что наиболее низкие напряжения испытывает материал с зернами размером 1 – 0,5 мм.

При медленном нагреве испытуемых изделий (рис. 4б) температурные напряжения (на глубине 5 мм) увеличиваются, доходя своего пика через 110 мин течения процесса, затем они медленно снижаются до исходных значений. Внутренний слой (20 мм от торца) достигает пика напряжения через 80 минут течения процесса (175, 140, 100 МПа) и практически остается неизменяемым до окончания эксперимента (кривые 10-12). Такая же тенденция наблюдается и на рисунке 4а, при котором



(а) – быстрый нагрев (0 – 700 °C)



(б) – медленный нагрев (0 – 1050 °C)

Глубина 5 мм фракции: 1 – 1-0,5 мм; 2 – $< 0,063$ мм; 3 – 2-1 мм; глубина 20 мм фракции: 4 – 1-0,5 мм; 5 – $< 0,063$ мм; 6 – 2-1 мм

Рис. 3. Температурные кривые исследуемых слоев при 700 °C.

пик температурного напряжения (σ) составляет для зерен размером 2 – 1 мм – 450 МПа; менее 0,06 – 425 МПа и 1 – 0,5 мм – 405 МПа.

Для установления поведения тепловых потоков в огнеупоре проведены опыты по скорости распределения энергии тепла в структуре гипотетических слоев материала. Результаты этих исследований приведены на рисунке 5.

Расчеты показали, что скорость теплового потока снижается с увеличением времени выдержки и температуры в следующей последовательности: при 500 °С на 78,7%; при 700 °С на 73,9%; при 900 °С на 65,6%; при 1050 °С на 69,3%.

Причем, следует отметить, что при температурах 900 и 1050 °С величина скорости теплового потока (70-80 Вт/мин) значительно ниже, чем при 500 и 700 °С (115-122 Вт/мин), которая связана со снижением теплопроводности периклаза с повышением температуры.

Установлено, что наибольшая скорость теплового потока характерна для зерен 2-1 мм, средняя – менее 0,063 мм и наименьшая – 1-0,5 мм.

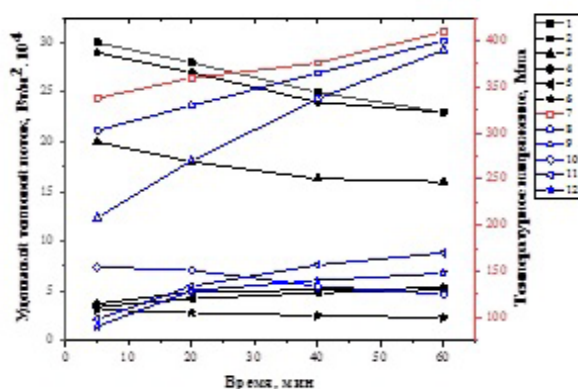
Важной характеристикой периклазовых огнеупоров является их термостойкость, т.е. противостояние материала резким перепадам температур. Одной из величин является скорость нагрева материала или скорость распространения тепловых потоков в структуре изделия.

На рисунке 5 приведен характер изменения температурных напряжений при различных скоростях воздействия теплового потока. Установлено, что с увеличением скорости воздействия тепла температурные напряжения увеличиваются. Так, согласно расчетам и кривым, полученным на рисунке 5, видно, что при глубине в 5 мм исследуемого слоя и скорости нагрева в 4 °С/мин напряжение составляет 287 МПа. В то же время с увеличением скорости нагрева до 42,5 °С/мин температурное напряжение не пропорционально увеличивается и составляет 416 МПа (в 1,5 раза).

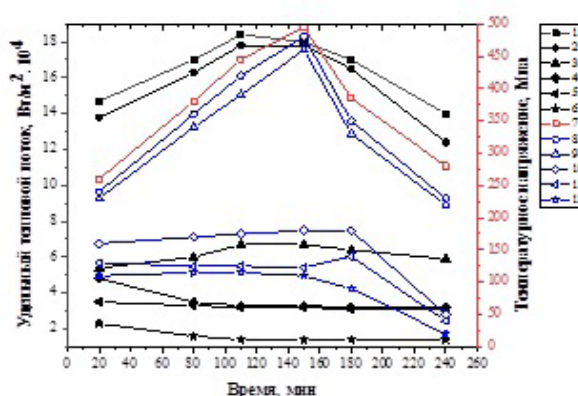
Причем, следует отметить, что в глубинном гипотетическом слое в 20 мм с уменьшением скорости нагрева напряжение в огнеупоре значительно снижается (в 6,6 раза), а при быстром нагреве напряжение концентрируется в этом слое и постепенно уменьшается (в 1,75 раза).

Термические напряжения, возникающие при градиенте температур в массе материала, разницы коэффициентов термического расширения, анизотропии расширения слагающих их фаз – определяют термическую стойкость огнеупоров. С этой целью исследована прочность огнеупоров при многократном нагреве и охлаждении изделий.

Разрушение, вызванное термическими напряжениями при градиенте температур, заключается в быстром расширении внешних слоев. При этом поверхностные слои подвергаются реакциям сжатия,



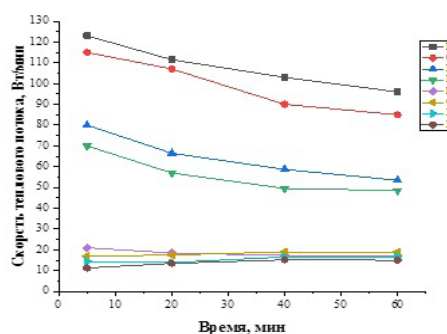
(а) – 700 °С (быстрый нагрев)



(б) – 1050 °С (медленный нагрев)

Глубина 5 мм фракции: 1 – 1-0,5 мм; 2 – <0,063 мм; 3 – 2-1 мм; глубина 20 мм фракции: 4 – 1-0,5 мм; 5 – <0,063 мм; 6 – 2-1 мм

Рис. 4. Изменение удельного теплового потока (q) и температурных напряжений (σ) в периклазовых огнеупорах исследуемых фракционных составов.



В, F – 500 °С; C, G – 700 °С; D, H – 900 °С; E, I – 1050 °С. Глубина установки термопар: В, C, D, E – 5 мм; F, G, H, I – 20 мм

Рис. 5. Изменение скорости распределения теплового потока во внутренних слоях огнеупора от времени воздействия. Периклазовый кирпич с зернами размером 1-0,5 мм.

а внутренняя часть изделия – реакциям растяжения. При охлаждении протекают обратные процессы. Если при этом величина напряжений превысит прочность материала, то происходит разрушение структуры изделия.

Разрушение огнеупоров под влиянием термических ударов [7] происходит стадийно – путем зарождения трещин и их распространения. Зарождение трещин определяется условиями теплового нагружения и физико-механическими свойствами материала. Однако, ряд исследований показали, что термическое разрушение зависит не только от указанных выше факторов, но и от геометрических характеристик изделий [1, 2, 8] присутствия в нем микротрещин, особенности структуры, размера зерен, а также примесей, увеличивающих количество вторичных фаз.

Целью данного исследования является исследование прочности периклазовых огнеупоров при многократном нагреве и охлаждении изделий.

Для достоверности эксперимента была разработана методика проведения эксперимента, при которой стандартный кирпич (115х65х250) мм разрезали на кубики размером 40х40х40 мм, которые подвергали термическому удару, путем их нагрева до температур 800, 1050 или 1300 °С и резком охлаждении материала принудительной воздушной струей.

Многократный процесс нагрева и охлаждения изделия характеризует его стойкостью к количеству теплосмен, которое он может выдержать с минимальной потерей массы от своего начального веса и разности потери прочности от значений до испытания.

Для испытания на термическую стойкость использовали достаточное количество образцов с интервалом с двух теплосмен, а затем по 5, 10, 15 и 20 теплосмен при температурах 800, 1050 или 1300 °С. У изделий, подвергнутых термическому удару после каждого интервала, измеряли площадь и определяли на прессе предел прочности при сжатии (МПа). После каждой теплосмены визуально определяли моменты появления трещин, а потерю массы регистрировали путем взвешивания, испытанных изделий.

Для определения термических напряжений и равномерного прогрева испытываемых изделий, в контрольных образцах были установлены термопары, которые регистрировали скорость изменения температуры на поверхности и внутри кубиков-изделий (40х40х40) мм при их нагреве и охлаждении.

В нагретую до заданной температуры (800, 1050 или 1300 °С) печь устанавливали образцы изделий и по показаниям мультиметров, подключенных к термопарам в контрольных образцах доводили температуру до заданных значений. Затем испы-

тываемые изделия извлекали из печи и охлаждали направленной струей воздуха до 25-50 °С. После охлаждения изделия вновь нагревали в печи, таким образом подвергая их многократному нагреву и охлаждению. Одновременно регистрировали время нагрева, разность температур на поверхности и внутри изделий, а также время выравнивания температуры по всему объему изделия. По полученным параметрам рассчитывали удельные тепловые потоки и температурные напряжения, которое испытывает изделие при нагреве и охлаждении.

При многократном нагреве и охлаждении изделий в результате термомеханических процессов происходят структурные нарушения. Оно сопровождается разрушением микроскопических связей и перемычек между зернами и кристаллами с образованием микротрещин. Многократные термические удары приводят к разрастанию трещин и их распространению по всей структуре изделия. В результате этого процесса появляются крупные трещины и сколы – разрушающие огнеупорные изделия [9-13].

Согласно разработанной методике нами проведены исследования изменения прочности изделий при многократном нагреве и охлаждении, которые приведены на рисунке 6.

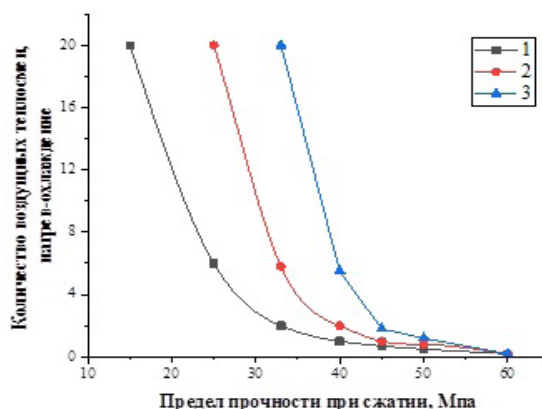
Установлено, что с повышением температуры нагрева от 800 до 1300 °С предел прочности при сжатии с количеством теплосмен уменьшается с 58,4 МПа (контрольных, не подвергнутых термическим ударам изделий) соответственно температурам до 33, 24 и 17 МПа. При визуальном осмотре при 5-ти кратном увеличении при испытании при 800, 1050 или 1300 °С наблюдалось появление микротрещин соответственно при 15, 12 и 7 теплосмене.

Регистрация разности температур на поверхности и внутри изделия в процессе испытания составила: при 800 °С – 25 °С; при 1050 °С – 130 °С; при 1300 °С – 250 °С.

Температурные напряжения и удельный тепловой поток на изделия во время испытания приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы, температурные напряжения и мощность теплового потока значительно превышают показатели прочности изделий, не подвергнутых термо удару практически в 2,5-4 раза. Время нагрева изделий до 800 °С составило 20 мин, до 1050 °С – 22 мин и до 1300 °С – 25 мин, соответственно, скорость нагрева испытываемого материала – 40, 47 и 52 °С/мин,

Вторым фактором является охлаждение изделий струей воздуха, на которое уходит: от 800 до 50 °С – 17,5 мин; от 1050 до 50 °С – 19,8 мин; от 1300 до 50 °С – 22 мин, что соответствует скорости охлаждения огнеупора – 45,7; 53,03; 59,0 °С/мин.



Температуры нагрева изделий: 1 – 1300, 2 – 1050, 3 – 800 °C

Рис. 6. Изменение усредненных значений предела прочности при сжатии периклазовых изделий в зависимости от количества воздушных теплосмен в режиме «нагрев-охлаждение».

Таблица 1

Термомеханические свойства испытанных изделий

Индекс образца	Температура, °C	Разница температур на поверхности и внутри изделия, °C	Температурное напряжение (σ), МПа	Удельный тепловой поток (q), Вт/м ² ·10 ⁴
1	800	25	32	0,97
2	1050	130	146	1,6
3	1300	250	245	3,1

Заключение

Проведенные исследования показывают, что на термостойкость огнеупоров большое влияние оказывает как многократный нагрев, так и многократное охлаждение изделий, что является причиной трещинообразования и разрушения изделий. Разрушение огнеупоров ускоряется при повышении температуры испытания изделия и скорости теплового потока, при которой нагревается и охлаждается материал.

Расчеты показали, что начало трещинообразования и разрушения огнеупоров начинается при скорости температуры нагрева 40-47,7 °C/мин и он интенсифицируется при скорости более 50-53 °C/мин.

Таким образом, установлено, что с повышением температуры удельные тепловые потоки снижаются, в то же время как температурные напряжения повышаются с 337 (500 °) до 416 МПа (1050 °C).

Наименьшие температурные напряжения испытывает материал, содержащий зерна размером 1-0,5 мм (286 МПа).

Установлено, что формирование термостойкой структуры огнеупоров определяется фракцион-

ным составом и распределением крупных, средних и мелких зерен шихты согласно скорости воздействия удельных тепловых потоков и температурных напряжений.

Список литературы

- [1]. Акишев А.Х., Фоменко С.М. Исследование термостойкости огнеупорных изделий-конструкций в термонапряженных условиях // Международная научно-практическая конференция «Современные инновационные системы машиностроения и транспорта. Интеграция науки, образования и бизнеса». – Алматы, 2018.- С.45-47.
- [2]. Якушев В.К. Процессы разрушения футеровок тепловых агрегатов. Алматы: Наука КазССР, 1997.- 350 с.
- [3]. Новожилов В.В. О пластическом разрыхлении. // Прикладная математика и механика. – 1965. – т.29. – вып.4. – С.681-690.
- [4]. Григорьев С.Н., Кузин В.В. и др. Влияние тепловых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из керамики на основе оксида алюминия. // Вестник машиностроения. – 2013. – с.68-71
- [5]. Jzadpanah M.R. (Iran). Predicton of the Thermal Shock

Resistance of Basic Refractory Materials Using fracture Resistance Parameters // Material Science an Indian Journal. – December. – 2009. – V.5. – P.405-409.

- [6]. Акишев А.Х., Фоменко С.М., Төлендіұлы С. Исследование внутрискруктурных напряжений при воздействии неравномерных тепловых нагрузок // Новые огнеупоры. – №5, 2019, с.10. (Web of Science)
- [7]. Кингери У.Д. Введение в керамику. / перевод с англ. – М.: Стройиздат, 1967.- 499 с.
- [8]. Куколев Г.В., Немец И.И. О теории термического удара неоднородных огнеупорных материалов // Огнеупоры. – 1965. – №8. – С.23-30.

Manifestations of internal stresses and thermal stability of periclasic refractory constructions

A.Kh. Akishev¹, S.M. Fomenko¹, S. Tolendiuly^{1,2}

¹Institute of combustion problems, Bogenbay Batyr street, 172, Almaty, Kazakhstan

²Satbayev University, Satpayev street, 22a, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

The perception of alternating heat load on the reaction of the refractory material is due to its fractional composition, which determines its structure, properties and parameters of the product. It forms the discreteness of the material with alternating dense sintered particles of different sizes with pore inclusions. When exposed to heat flow, the fireproof material experiences the forces of resistance to destruction by manifestations of compression reactions during its thermal expansion. The fractional composition of the material determines its thermomechanical characteristics and the distribution of internal stresses under the influence of heat flow, which form the heat resistance of refractory structures. The work is devoted to the study at the macro-micro level of thermal stresses in the structure of the fractional composition of periclase refractories at high and low heat flows and their influence on thermal stability.

Keywords: heat flow, thermal stress, structure, periclase refractory structures, discrete material, fractional composition, temperature gradient, heat resistance.

Термиялық тұрақтылығы мен ішкі кернеудің пайда болуы

А.Х. Акишев¹, С.М. Фоменко¹, С. Төлендіұлы^{1,2}

¹Жану проблемалары институты, ул. Бөгенбай батыр 172, Алматы, Қазақстан

²Satbayev University, Сәтпаев к-сі, 22а, Алматы қ., Қазақстан

АНДАТПА

Отқа төзімді материалдың реакциясына ауыспалы жылу жүктемесін қабылдауына оның құрылымын, қасиеттерін және өнім параметрлерін анықтайтын бөлшек құрамына байланысты. Ол әр түрлі мөлшердегі кеуектері бар тығыздалған, өзгермелі дискретті материалды құрайды. Жылу ағынына ұшыраған кезде, отқа төзімді материал температурасының кеңеюі кезінде қысу реакцияларының көріністерімен жойылуға қарсы тұрады. Материалдың фракциялық құрамы оның термехикалық сипаттамаларын және отқа төзімді құрылымдардың жылу кедергісін құрайтын жылу ағынына ұшыраған кезде ішкі кернеулердің таралуын анықтайды. Жұмыс жоғары және төмен жылу ағындарындағы периклаз отқа төзімді фракциялық құрамы құрылымындағы макро-микро деңгейдегі жылу кернеулерін және олардың жылу кедергісіне әсерін зерттеуге арналған.

Түйін сөздер: жылу ағыны, жылу кернеуі, құрылым, периклазды отқа төзімді құрылымдар, дискретті материал, бөлшек құрамы, температура градиенті, жылу кедергісі.