

ВНУТРИСТРУКТУРНОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ – ОСНОВНОЙ ФАКТОР РАЗРУШЕНИЯ ОГНЕУПОРОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

А.Х. Акишев¹, С.М. Фоменко¹, С. Төлендіұлы^{1,2}, Д.Т. Қашқынбай^{1,2}, Н.Т. Рахым^{1,2}

¹ Институт проблем горения, ул. Богдаман батыра, 172, Алматы, Казахстан

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

Дата поступления:
4 Марта 2019

Принято на печать:
28 Марта 2019

Доступно онлайн:
6 Мая 2019

УДК 669.04:666.76

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена изучению возникающих температурных напряжений при градиенте температур при воздействии тепловых потоков на огнеупорные материалы. На разработанной экспериментальной установке исследованы микро- и макроуровневые структурные процессы, происходящие в материале. В работе исследовано воздействие тепловых импульсных потоков в периклазовых огнеупорах на возникновение векторных напряжений в прибрежных слоях от рабочей поверхности и внутренних структурных элементах. Макро- и микроструктурные исследования показали, что интенсивные тепловые потоки и возникающие температурные напряжения способствует образованию структурных дефектов и разрыву межкустаческих связей. Температурные напряжения и переменные нагрузки, возникающие во время этого процесса, образуют сложные элементы структуры в материале в виде разноразмерных блоков, разделенных порами. Приведены результаты электронно-микроскопических исследований структурных и фазовых изменений при воздействии тепловых импульсных потоков. Показано послойное изменение внутренней структуры и фазового состава при температурах от 500 до 1500 °С и скорости нагрева в интервале от 5 до 45 °С/мин. Изменение фазового состава в межкустаческих и межзерновых контактах материала накладывается на термонапряжения, возникающие при знакопеременных нагрузках, которое может снижать напряжения или их увеличивать в зависимости от температуры. Установлено, что изменение температурных напряжений зависит от фазовых изменений при тепловом воздействии на огнеупор.

Ключевые слова: удельный тепловой поток, периклазовый огнеупор, термическое напряжение, структура огнеупора.

Введение

Стойкость огнеупорных материалов к знакопеременным тепловым нагрузкам является наиболее важной проблемой при футеровке современных металлургических печей. В результате изменения температурного режима на изделиях провоцируется образование трещин, которые приводят к быстрому износу и разрушению материала [1].

Разрушение структуры огнеупорного изделия происходит в результате возникающих напряжений в межкустаческих и межзерновых связующих компонентах материала. Основными факторами являются: быстрый нагрев и охлаждение футеровки, а также проникновение шлака и расплава металла внутрь огнеупора. Одной из актуальных и нерешенных проблем является не-

равномерное распределение теплового потока по гипотетическим слоям [2, 3], и установление достоверности температурных напряжений, возникающих в комплексных элементах структуры в виде связанных спеченных блоков с кольцевыми микропорами. Известной особенностью структуры огнеупорных материалов является разнородность по гранулометрическому составу контактирующих кристаллических материалов с включениями или граничащими с порами различной канальной направленности и размерами, а также их фазовым составом [4, 5]. Минеральный состав контактирующих частиц кристаллов, образованный в результате высокотемпературного обжига и диффузионных процессов, формируют на микроуровне в огнеупорном материале подвижные фазы, которые при температурном воздействии становятся более активными.

Материал, контактирующий с тепловым потоком, расширяется, вследствие этого возникают реактивные силы сжатия [6, 7]. При равномерном нагреве эти реактивные силы незначительны и компенсируются самой структурой огнеупора, а на границе раздела нагретого и холодного слоя возросшие напряжения становятся недостаточными противостоять силам теплового воздействия на материал. На микроуровне это явление характеризуется появлением микротрещин на границах связей кристаллов, которые являются начальными релаксаторами напряжений материала. По мере передвижения фронта теплового потока и повышения температуры микротрещины могут залечиваться диффузионными процессами, а с появлением новой жидкой фазы перенос вещества ускоряется [8].

С понижением температуры жидкофазные минералы кристаллизуются, чаще всего с уменьшением объема и образованием новой структуры. Изучение воздействия тепловых потоков на огнеупорные материалы и возникающих температурных напряжений при градиенте температур проводили на микро-, макроструктурном уровне.

Результаты и обсуждение

Постановку экспериментов проводили путем измерения и регистрации температур при помощи приборов измерения температур UNI-TUT 320D на концах выводов термопар, установленных в заданных точках от поверхности торца кирпича размером 65x115 мм.

Схема размещения термопар в контрольных точках представлена на рисунке 1.

Исследование теплофизических процессов в огнеупоре осуществлялось при шоковом нагреве торца кирпича в предварительно разогретой печи (а) и медленном нагреве (б) изделия вместе с печью.

Послойное измерение температуры по длине кирпича позволило установить величину удельных тепловых потоков (1) и температурных напряжений (2) на глубинах: 10, 45, 80 и 145 мм (рис. 1).

Величина этих показателей (1 и 2) обусловлены возникновением полей градиентов температур и изменении свойств элементов структуры при термическом расширении, температурно- и теплопроводности минералов и модуля упругости изделий. Модуль упругости периклазовых изделий определяли динамическим методом с использованием генератора ультразвуковых колебаний, а коэффициент Пуассона – стандартным методом на кубиках с размером ребра 60 мм.

При расчете использовали данные изменения теплопроводности периклазовых изделий от фракционного, химического состава (таблицы 1 и 2) и температуры.

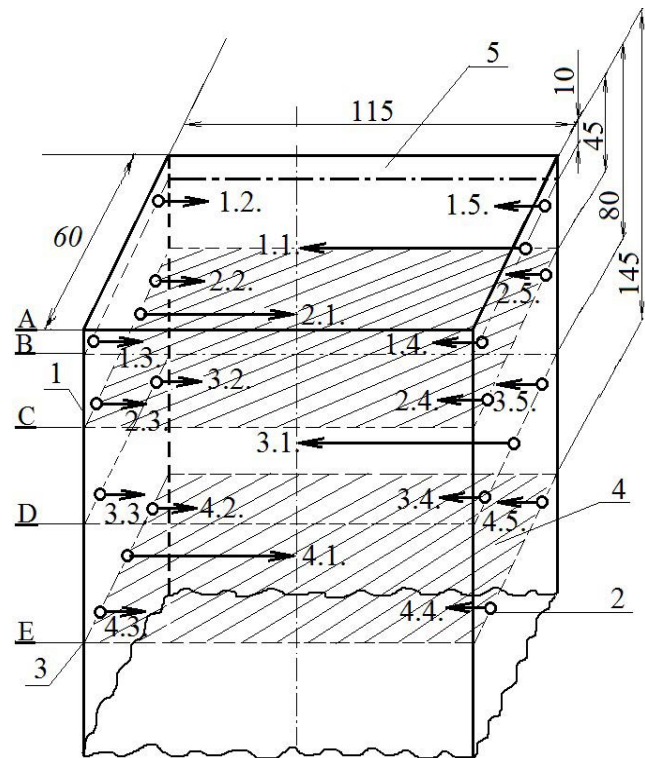


Рис. 1. Схема установки термопар в огнеупорном периклазовом кирпиче: 1 – тело кирпича; 2 – отверстие для установки термопар; 3 – глубина установки термопар в кирпиче; 4 – выделенные исследуемые слои кирпича; 5 – торцы кирпича. Обозначение точек: 1.1÷1.5 – точки установки термопар в исследуемом слое на глубине – 10 мм; 2.1÷2.5 – 45 мм; 3.1÷3.5 – 80 мм; 4.1÷4.5 – 145 мм; А, В, С, D, Е – исследуемые слои изделия.

Графические кривые изменения в координатах температура – время удельных тепловых потоков и температурных напряжений показано на рисунке 2 (а,б). Из рисунка 2а очевидно, что с повышением температуры от 500 до 1050° температурные напряжения уменьшаются синхронно снижению удельного теплового потока.

Показатели рассчитанных величин показывают, что термические напряжения по времени выдержки снижаются в 3,5–5,7 раза, а удельные тепловые потоки в 3,37 раза, которые обусловлены рассеиванием теплового потока в межзерновом микропространстве изделия. Исследование слоя АЕ до глубины 145 мм (рис. 2б) показало, что с увеличением температуры термонапряжения увеличиваются в 2,5–4 раза, а в некоторых структурных позициях до 7–9 раз, тогда как удельный тепловой поток в этой зоне, напротив, снижается в 3–5 раз.

Это показывает, что термонапряжения концентрируются в глубинных слоях огнеупора, которое связано с понижением температуры в этих зонах и, соответственно, с изменением теплофизических свойств материала.

Установлено [2], что с увеличением размера зерна во фракционном составе шихты повышается тепло-

Таблица 1

Исследуемые периклазовые изделия

Индекс массы	Наименование периклазовых огнеупоров	Размер зерен, (мм), состав, %						
		7-5	5-3	3-2	3-0,5	1-0,5	1-0,063	<0,063
M-1	Мелкозернистый	-	-	-	-	80	-	20
M-2	Среднезернистый	-	-	60	-	-	-	40
M-3	Крупнозернистый (1)	-	60	-	20	-	-	20
M-4	Крупнозернистый (2)	40	20	-	20	-	-	20
M-5	Промышленный П-91	-	-	-	-	-	100	-

Таблица 2

Химический состав исследуемых периклазовых изделий

Индекс массы	Содержание, %				
	MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
M-1, M-2, M-3, M-4, M-5	98,5	0,1	0,1	1,07	0,58
	94,5	2,09	1,49	1,64	-

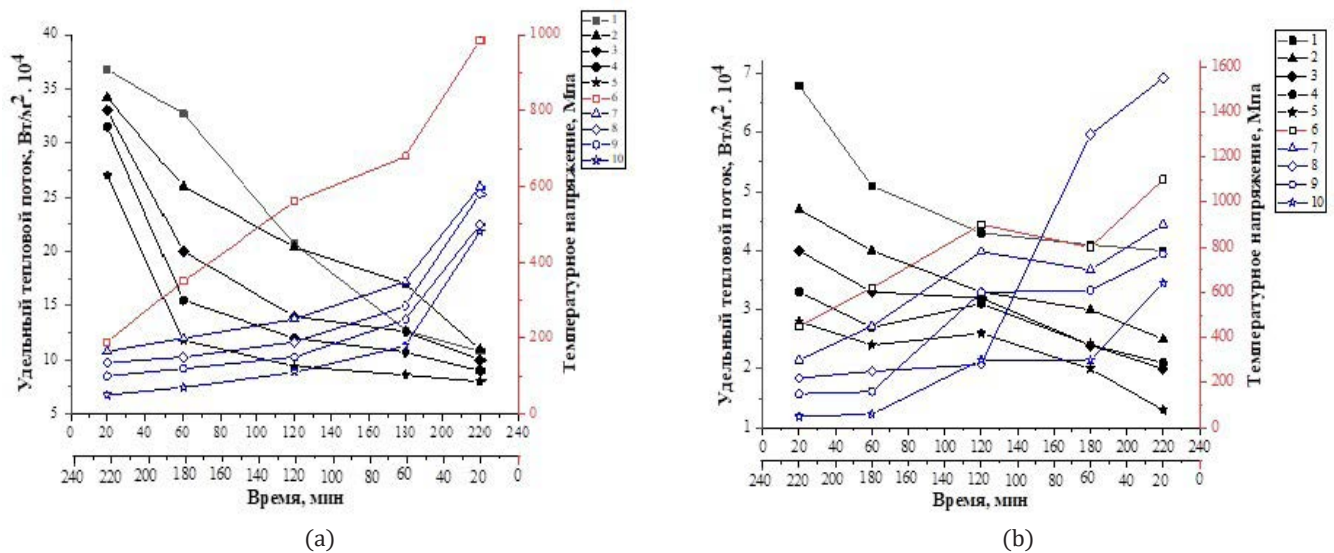


Рис. 2. Изменение удельных тепловых потоков (кривые 1-5) и температурных напряжений (кривые 6-10) в зернистых периклазовых огнеупорах в координатах температура – время: а – в слое АВ до глубины 10 мм, б – в слое АЕ до глубины 145 мм.

проводность огнеупоров и изменяются параметры линейного расширения и взаимодействия межкристаллического и фазового состава материала.

На рисунке 3 (а, б) показано, что температурные напряжения снижаются в прибрежном слое (АВ) на 30%, а в удалении от поверхности (АЕ) на 22%. В структуре огнеупора на уровне слоя АЕ температурные напряжения в начальной стадии увеличиваются в 6,7–8 раза, а по истечении времени этот показатель снижается в 2,7–2,9 раза.

Отсутствие синхронности между показателями удельного теплового потока и температурными напряжениями огнеупора хорошо согласуется с непостоянством температуры и изменяющимися значениями коэффициентов теплопроводности и

термического расширения материала от его гранулометрического и минерального состава.

Результаты электронно-микроскопических исследований структурных изменений при воздействии тепловых импульсных потоков показали послойное изменение внутренней структуры с появлением микротрещин, связанных с температурными напряжениями и преобразованиями фаз.

В частности, прибрежный слой, подвергнутый быстрому нагреву и медленному охлаждению (рис. 4), имеет дисперсные выделения фаз оксида магния и примесей в свободном состоянии и в виде минеральных соединений CaO, SiO₂, Fe₂O₃, FeO, которые в большей части концентрируются в появившихся микротрещинах и их разветвлениях.

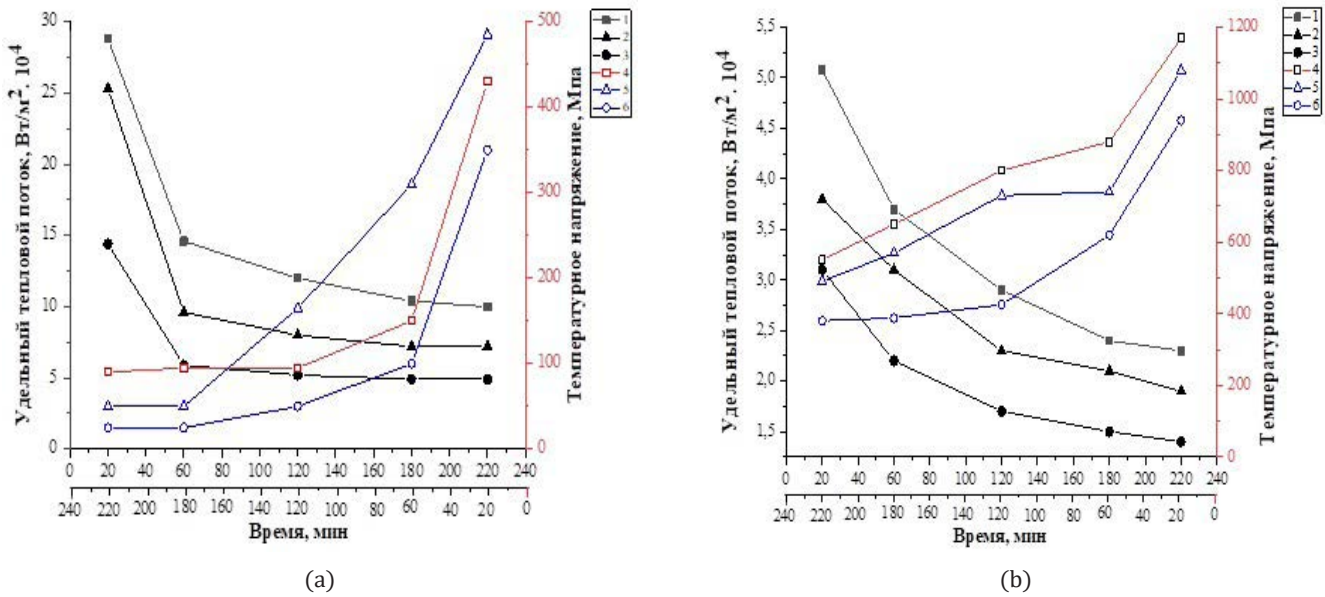


Рис. 3. Изменение удельных тепловых потоков (кривые 1, 2, 3) и температурных напряжений (кривые 4, 5, 6) периклазовых огнеупоров различного фракционного состава масс (таблица 1) в координатах температура – время. Обозначение: 1, 4 – М-2; 2, 5 – М-3; 3, 6 – М-4. (а) – в слое АВ до глубины 10 мм, (б) – в слое АЕ до глубины 145 мм.

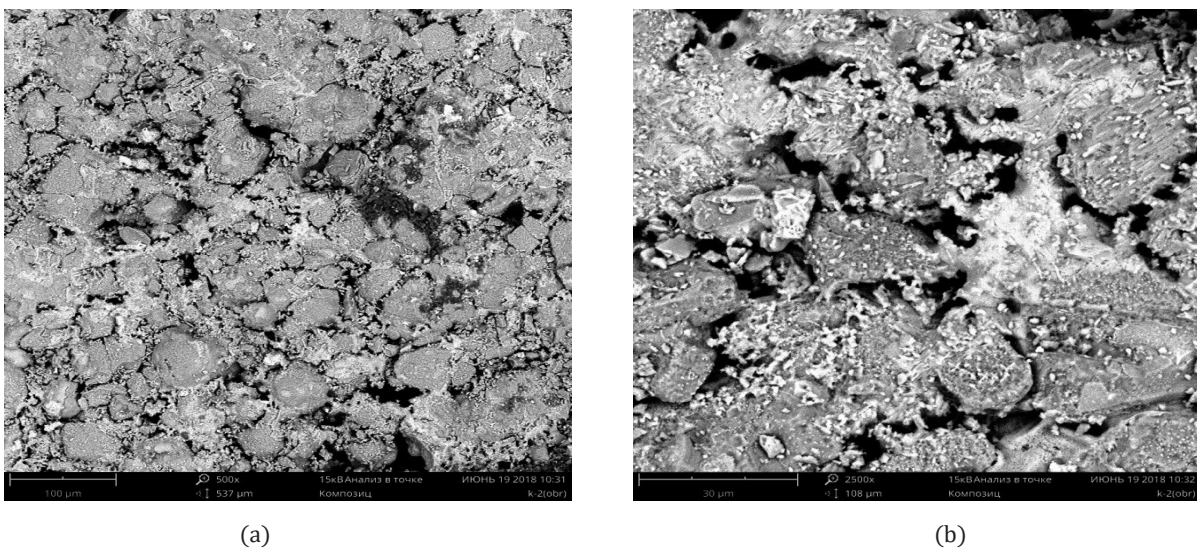


Рис. 4. Изменение удельных тепловых потоков (кривые 1-5) и температурных напряжений (кривые 6-10) в зернистых периклазовых огнеупорах в координатах температура – время.

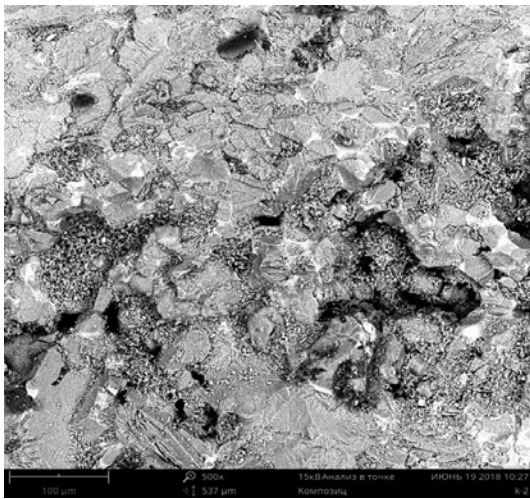
Рассматривая структуру лицевой стороны поверхности огнеупора на рисунке 5 можно заметить, что она испещрена канальными порами, которые образуют свободную сеть слабосвязанных фрагментированных структурных элементов. В удалении от поверхности в слое АЕ количество микротрещин снижается и процесса активного фазообразования не наблюдается.

Рентгенографический, фазовый анализы и микроструктурные исследования излома кирпича, не подвергнутого термообработке (рис. 6) показали, что зерна периклаза (область 1) содержат

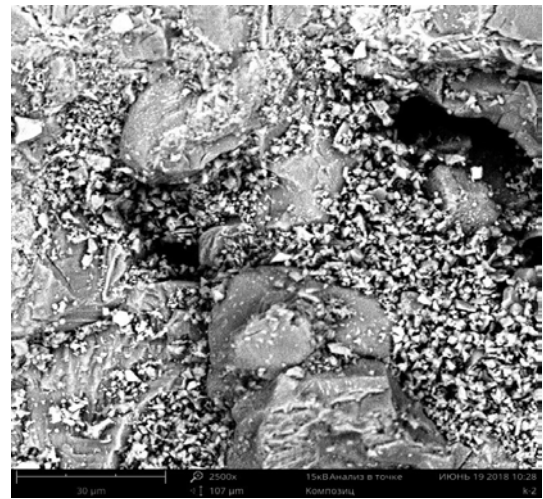
MgO 96,35%, растворенный в нем магнезиоферрит (MgFe_2O_4) 2,3 – % и небольшое количество силикатов в виде монтичеллита 1,35%.

Область (2) представлена в виде силикатных включений, в которой обнаружены легкоплавкие минералы: монтичеллит ($\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$), гидратная форма алюмосиликата ($\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})$), следы свободного кварца и кристобалита.

Общий фазовый состав периклазового огнеупора составил, вес.%: MgO –94,6, монтичеллит – 3,9, гидратная фаза – 0,4–0,8%, магнезиоферрит – 1,8%.



(a)



(b)

Рис. 5. Микроструктура лицевой поверхности периклазового огнеупора после теплового импульсного воздействия. Увеличение: а) $\times 500$, б) $\times 2500$. Темное поле – поры.

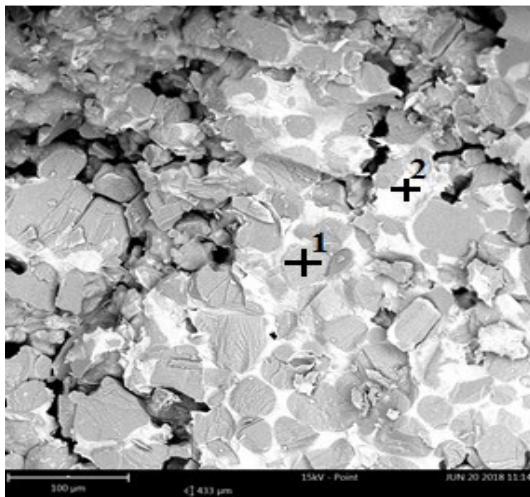


Рис. 6. Микроструктура излома периклазового огнеупора, не подвергнутого термообработке. Увеличение: $\times 500$. Исследование минерального фазового состава в точке: 1 – периклазовая область, 2 – силикатные включения

Заключение

Получены температурные характеристики нагрева огнеупоров, по которым рассчитаны удельные тепловые потоки и температурные напряжения на поверхности и во внутренних слоях огнеупора на глубину – 10, 45, 80, 145 мм.

Установлены особенности изменения температурных напряжений в зависимости от фракционного состава и размера зерен шихты. Показано, что с повышением температуры температурные напряжения уменьшаются синхронно снижению удельного теплового потока. С увеличением размера зерна в шихте снижение температурные напряжения снижаются на 30% .

При изучении тепловых процессов на значительном расстоянии от поверхности нагрева огнеупора наблюдается нарушение синхронности, которое показало, что с понижением удельного теплового потока в этих слоях температурные напряжения возрастают.

Изменение фазового состава в межкристаллических и межзерновых контактах материала накладывается на термонапряжения, возникающие при знакопеременных нагрузках, которые могут снижать напряжения или их увеличивать в зависимости от температуры, являющейся основным фактором появления новых соединений или твердых растворов, которые формируют межфазовые напряженные состояния и как следствие изменяют прочность огнеупора. Умеренные термонапряжения и высокие температуры способствуют упрочнению материала в результате залечивания микродефектов. В процессе спекания образовавшиеся в результате диффузии химические соединения и твердые растворы формируют межфазные напряжения с заданными физико-химическими свойствами. Оптимизировать процессы спекания огнеупора с участием твердой и жидкой фазы, с регулируемой способностью материала противостоять термическим напряжениям можно, применяя методы самоспекания, высокотемпературного синтеза и другие новые технологические приемы.

Литература

- [1]. Кашеев И.Д. Химическая технология огнеупоров. – М.: Интернет инжиниринг. – 252 с. (2007).
- [2]. Стрелов К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. – М.: Metallurgy – 606 с. (1996).

- [3]. Григорьев С.Н., Кузин В.В., Буртон Д., Батько Н.Д. Влияние тепловых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из керамики на основе оксида алюминия. // Вестник машиностроения. – С.68-71 (2012).
- [4]. Sayel M.F, Ghazi S.A, Suleiman, Q.A. Improvement of the Refractoriness under Load of Fire-Clay Refractory Bricks // Adv. Theor. Appl. Mech. – V.5 (4). – P.161-172 (2012).
- [5]. Григорьев С.Н. Влияние свойств керамики на напряженно-деформированное состояние режущей пластины в условиях установившейся теплопроводности // Вестник машиностроения. – №4. – С.76-80 (2012).
- [6]. Olokode O.S, Aiyedun P.O., Raheem D.M, Owoyebe F.T, Anyanwu B.U. Production and Characterization of Clay – Cow Dung Insulating Fire – bricks // Global Advanced Research Journal of Engineering, Technology and Innovation. – V.1 (7). – P.162-167 (2012).
- [7]. Перепелицын В.А., Остряков Л.В., Острякова И.В. Генезис трещин в огнеупорах // Новые огнеупоры. – N 3. – С.17-18 (2015).
- [8]. Osarenmwinda J.O., Chukwuemeka P. Performance Evaluation of Refractory Bricks produced from locally sourced Clay Materials // J. Appl. Sci. Environ. Manage. – V.18, №2. – P.151-157 (2014).

Ішкі құрылымдық температуралық кернеу – металлургиялық пештердің отқа төзімділігінің бұзылуының негізгі факторы

А.Х. Акишев¹, С.М. Фоменко¹, С. Төлөндіұлы^{1,2}, Д.Т. Қашқынбай^{1,2}, Н.Т. Рахым^{1,2}

¹Жану проблемалар институты, ул. Богенбай батыр көшесі, 172, Алматы, Қазақстан

²Satbayev University, Сәтбаев көш., 22а, Алматы қ., Қазақстан

АНДАТПА

Жұмыс отқа төзімді материалдарда температура градиенті мен жылу ағыны әсерінен пайда болатын температуралық кернеулерді зерттеуге арналған. Материалда болып жатқан микро- және макродеңгейлік құрылымдық процестер әзірленген тәжірибелік қондырғыда зерттелді. Жұмыс бетінен және ішкі құрылымдық элементтерден шеткі қабаттарда векторлық кернеулердің пайда болуына периклазды отқа төзімді жылу импульстік ағындардың әсері зерттелген. Макро- және микроқұрылымдық зерттеулер қарқынды жылу ағындары мен пайда болатын температуралық кернеулер, құрылымдық ақаулардың пайда болуы мен кристаллаларлық байланыстардың үзілуіне ықпал ететінін көрсетті. Осы процесс кезінде пайда болатын температуралық кернеулер мен ауыспалы жүктемелер материалдағы әртүрлі өлшемдік блоктар түріндегі құрылымның күрделі элементтерін құрайды.

Жылулық импульстік ағындар кезіндегі құрылымдық және фазалық өзгерістердің электронды-микроскопиялық зерттеулер нәтижелері келтірілген. 500-ден 1500 °С-ге дейінгі және қыздыру жылдамдығы 5-тен 45 °С/мин аралығындағы ішкі құрылымдық және фазалық құрамының қабаттық өзгерісі көрсетілген. Материалдың кристаллаларлық және дәнаралық байланысындағы фазалық құрамының өзгерісі, ауыспалы таңбаға ие жүктемелер кезінде туындайтын термиялық кернеуге қосылады, бұл өз кезегінде температураға байланысты кернеуді төмендетеді немесе оны арттырады. Температуралық кернеулердің өзгеруі отқа төзімді материалға жылулық әсер ету кезіндегі фазалық өзгерістерге байланысты екені анықталды.

Түйінді сөздер: Меншікті жылу ағыны, периклазды отқа төзімді материал, термиялық кернеу, отқа төзімді материалдың құрылымы.

Internal structural thermal stress is the main factor in the destruction of refractory for metallurgical furnaces

A.Kh. Akishev¹, S.M. Fomenko¹, S. Tolendiuly^{1,2}, D.T. Kashkynbay^{1,2}, N.T. Rakhym^{1,2}

¹Institute Combustion Problems, 172 Bogenbai Street, Almaty, Kazakhstan

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

ABSTRACT

The work is devoted to the study of emerging temperature stresses at a temperature gradient under the influence of heat fluxes on refractory materials. The micro- and macro-level structural processes occurring in the material are investigated on the developed experimental setup. The paper studies the effect of thermal impulse flows in periclase refractories on the occurrence of vector stresses in the coastal layers from the working surface and internal structural elements. Macro- and microstructural studies have shown that the intense heat fluxes and emerging temperature stresses contribute to the formation of structural defects and rupture of intergranular bonds. Temperature stresses and variable loads arising during this process form complex structural elements in the material in the form of multi-dimensional blocks which separated by pores.

The results of electron microscopic studies of structural and phase changes under the influence of thermal impulse flows are presented. The layer-by-layer change in the internal structure and phase composition at temperatures from 500 to 1500 °C and the heating rate in the range from 5 to 45 °C/min is shown. The alteration in the phase composition in the intergranular and

intergranular contacts of the material is superimposed on the thermal stresses arising under alternating loads, which can reduce stresses or increase them depending on the temperature. It is established that the alteration in temperature stresses depend on the phase changes in the thermal effect on the refractory properties.

Keywords: Specific heat flux, periclase refractory, thermal stress, refractory structure.