

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОПЛОТНОГО БЕТОНА ДЛЯ ФУТЕРОВКИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

У статті представлені результати розробки низькоцементного шамотного бетону для теплоізоляційного шару двошарового бетонного виробу. З використанням симплекс-гратчастого методу планування експерименту оптимізовано речовинний і зерновий склад заповнювача, який складається з браку і лому легковагих вогнетривів та шамоту, і забезпечує формування механічно міцної структури бетону. Наведено результати промислових випробувань двошарових з градієнтною пористістю у футеровці обертової для випалу каоліну

Ключові слова: футерівка, обертова піч, теплоізоляційний бетон, заповнювач, зерновий склад

В статье представлены результаты разработки низкоцементного шамотного бетона для теплоизоляционного слоя двухслойного бетонного изделия. С использованием симплекс-решетчатого метода планирования эксперимента оптимизирован вещественный и зерновой состав заполнителя, который состоит из брака и лома легковесных огнеупоров и шамота, обеспечивающий формирование механически прочной структуры бетона. Приведены результаты промышленных испытаний двухслойных бетонных изделий с градиентной пористостью в футеровке вращающейся печи для обжига каолина

Ключевые слова: футеровка, вращающаяся печь, теплоизоляционный бетон, заполнитель, зерновой состав

Ю. А. Онасенко

Аспирант*

Контактный тел.: 066-056-88-97

E-mail: Juliany4@mail.ru

В. В. Песчанская

Доцент*

Контактный тел.: 050-69-396-77

E-mail: v_peschanska@mail.ru

И. В. Голуб

Доцент*

Контактный тел.: 050-45-317-82

*Кафедра химической технологии керамики и огнеупоров

Национальная металлургическая академия Украины
пр. Гагарина 4, м. Днепропетровск, Украина, 49005

1. Введение

Приоритетным направлением в решении задач энергосбережения при эксплуатации высокотемпературных тепловых агрегатов различного назначения является снижение потерь тепла через их футеровку. Применение эффективных видов огнеупоров позволяет снизить потери тепловой энергии, стабилизировать температурный режим в рабочем пространстве агрегата и увеличить длительность межремонтных периодов.

Широкое распространение в цементной, металлургической и других отраслях промышленности получили вращающиеся печи, которые в зависимости от вида обжигаемого материала, технологической зоны агрегата футеруются огнеупорами различных типов. В огнеупорной промышленности Украины вращающиеся печи применяются, в основном, для обжига огнеупорных глин и каолинов при производстве шамота – основного материала для изготовления алюмосиликатных огнеупорных изделий, заполнителей, бетонов, мертелей и растворов. Разработка и применение эффективных огнеупоров для рабочего и тепло-

изоляционного слоев футеровки вращающихся печей, обеспечивающих высокую стойкость к комплексному воздействию разрушающих факторов (химических, термомеханических, истирающих и деформационных нагрузок) и минимальные потери тепла через корпус печи, является актуальной задачей.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Эффективным решением проблемы улучшения теплотехнических и эксплуатационных свойств футеровок вращающихся печей является изготовление комбинированных многослойных футеровок из унифицированных огнеупорных изделий, бетонных блоков и секций рациональной геометрической конфигурации [1]. В этой связи представляет интерес опыт изготовления многослойных огнеупоров с градиентной пористостью и теплопроводностью, предназначенных одновременно для рабочего и теплоизоляционного слоев футеровки. Известен ряд технологических

разработок по изготовлению двухслойных и многослойных огнеупоров для вращающихся печей различного химико-минералогического состава [2 – 6]. Фактором, сдерживающим массовое промышленное производство изделий с дифференцированными свойствами, является усложнение технико-технологических процессов, связанных с формованием изделий из масс различного вещественного состава, выбором оптимального режима обжига, обеспечивающего формирование заданной структуры плотного и теплоизоляционного слоев огнеупора.

Современный уровень развития теоретических основ и практического применения бетонов нового поколения, к которым относятся низкоцементные огнеупорные бетоны алюмосиликатного и корундового составов, определяют возможность изготовления многослойных безобжиговых изделий сложной конфигурации из огнеупорных бетонов. При этом выбор рациональной толщины слоев многослойного бетонного изделия обеспечит необходимые теплофизические характеристики футеровки и, как результат, снижение потерь тепла через кожух агрегата.

К настоящему времени накоплен значительный опыт практической реализации технологий изготовления изделий и монолитных футеровок из низкоцементных огнеупорных бетонов, отличающихся низкой пористостью, высокой плотностью и механической прочностью, химической стойкостью к агрессивным агентам [7, 8].

В ранее проведенных авторами работах [11, 12] разработан зерновой и вещественный состав уплотненного низкоцементного шамотного бетона, предназначенного для изготовления монолитной футеровки или изделий сложной конфигурации, применяемых для футеровки высокотемпературной зоны обжига вращающейся печи. Для изготовления бетонных изделий с градиентной пористостью, одновременно выполняющих функции рабочего и теплоизоляционного слоев, необходимо использование высокопористого бетона.

В литературе сведения о разработках в области создания огнеупорных легковесных бетонов весьма ограничены. Известны разработки составов эффективных легковесных бетонов с низкой теплопроводностью, для изготовления которых используется наполнитель – предварительно обожженный микропористый гексаалюминаткальциевый легковесный брикет [9, 10].

Сложности в решении основной проблемы в технологии легковесных бетонов, связанной с необходимостью предварительного изготовления пористого наполнителя, сдерживают развитие технологий низкоцементных теплоизоляционных бетонов. В качестве альтернативного вида пористого наполнителя для теплоизоляционных бетонов могут быть использованы промышленные отходы – брак и лом теплоизоляционных шамотных легковесных изделий.

3. Цель и задачи исследования

В проведенной работе ставилась задача исследования влияния вещественного и зернового состава пористого наполнителя на комплекс взаимосвязанных физико-технических показателей свойств низкоплотного шамотного бетона и выбор рационального зерно-

вого состава наполнителя, обеспечивающего формирование механически прочной и пористой структуры бетона.

С целью установления эксплуатационных свойств двухслойных бетонных изделий, состоящих из слоев низкоплотного и плотного бетона, предполагалось изготовление и испытание опытно-промышленной партии бетонных изделий в футеровке зоны обжига вращающейся печи.

4. Методики исследований. Результаты эксперимента и их обсуждение

Для приготовления низкоцементного бетона использовали гидравлическое вяжущее – высокоглиноземистый цемент «Gorkal -70», наполнитель – брак и лом легковесных шамотных изделий марок ШКЛ-1,3 и ШЛ-1,0 и тонкодисперсный шамот ШКВ-2 производства ПАО «Великоанадольский огнеупорный комбинат». В качестве пластифицирующих и дефлокулирующих добавок применяли триполифосфат натрия и микрокремнезем – техногенный продукт, представляющий собой шламовые отходы производства ферросплавов.

Для установления рационального вещественного и зернового состава наполнителя низкоплотного бетона использовали симплекс-решетчатый метод математического планирования эксперимента. Область исследуемых зерновых составов наполнителя ограничивалась содержанием зерен брака и лома легковесных изделий фр. 10 – 0,5 мм (X_1) – 30 – 40 % и фр. 0,5 – 0,088 мм (X_2) – 15 – 25 %, тонкодисперсного шамота (X_3) фр. < 0,088 мм – 40 – 50 %. Количество цемента и микрокремнезема, вводимых в бетонную смесь в соотношении 1 : 1, для всех исследуемых составов принято постоянным – 10 %. Добавка триполифосфата натрия вводилась в бетонную смесь в количестве 0,15 % (сверх 100 %). В качестве параметров оптимизации приняты показатели свойств бетонных образцов, термообработанных при температурах 350 °С и 1300 °С с выдержкой при максимальной температуре 3 часа: кажущаяся плотность (ρ), открытая пористость (P) и предел прочности при сжатии (σ).

Приготовление бетонных масс влажностью 9 – 9,5 % осуществляли в лабораторной мешалке планетарного типа. Из бетонных масс формировали образцы-кубы с размером ребра 70 мм методом вибрационного формования в разборных металлических формах при частоте 50 Гц. Образцы после твердения на воздухе в течение 2-х суток термообработывали в электропечи. Определение показателей свойств образцов (открытая пористость и кажущаяся плотность, предел прочности при сжатии, дополнительная линейная усадка (Δl), термостойкость) проводили согласно ГОСТ 2409 – 95, ГОСТ 4071.1 – 94, ГОСТ 5402-81 и ГОСТ 7875 – 83; коэффициент теплопроводности (λ) по ASTM C – 1113 и ISO 8894. Петрографические исследования образцов опытно-промышленных изделий проводились с использованием оптического поляризационного микроскопа МИН-8.

Матрица планирования эксперимента и результаты определения показателей свойств бетонных образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента и результаты опытов

Номер композиции	Факторы						Показатели свойств*		
	Кодированные значения			Натуральные значения, %			ρ, г/см ³	П, %	σ, Н/мм ²
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃			
1	1	0	0	40	15	45	1,64 1,60	34,00 33,05	26,2 19,5
2	0	1	0	35	25	40	1,55 1,75	35,24 31,75	28,4 23,0
3	0	0	1	30	20	50	1,50 1,55	35,62 33,84	24,7 16,4
4	1/2	1/2	0	37,5	20	42,5	1,76 1,77	31,80 32,05	32,3 26,1
5	1/2	0	1/2	35	17,5	47,5	1,68 1,71	33,65 33,52	27,5 21,3
6	0	1/2	1/2	32,5	22,5	45	1,73 1,79	31,86 32,06	29,8 25,6
7	1/3	1/3	1/3	35	20	45	1,74 1,80	31,25 31,25	31,8 27,0

* – средние значения 5-ти параллельных определений; числитель – температура термообработки 350 °С, знаменатель – 1300 °С

По результатам математической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии в системе «состав – свойство» (табл. 2) и построены их графические интерпретации (рис.1).

Анализ зависимостей изменения свойств образцов,

Таблица 2

Полиномиальные модели в системе «состав – свойство»

Показатели свойств	Уравнения регрессии*
Кажущаяся плотность, ρ, г/см ³	$\rho_{350} = 1.640X_1 + 1.550X_2 + 1.50X_3 + 0.66X_1X_2 + 0.44X_1X_3 + 0.82X_2X_3$ $\rho_{1300} = 1.6X_1 + 1.75X_2 + 1.54X_3 + 0.38X_1X_2 + 0.55X_1X_3 + 0.55X_2X_3$
Открытая пористость, П, %	$P_{350} = 34,0X_1 + 35,24X_2 + 36,62X_3 - 11,28X_1X_2 - 6,64X_1X_3 - 16,28X_2X_3$ $P_{1300} = 33,05X_1 + 31,75X_2 + 33,84X_3 - 1,4X_1X_2 - 3,68X_1X_3 - 2,94X_2X_3$
Предел прочности при сжатии, σ, Н/мм ²	$\sigma_{350} = 26,2X_1 + 28,4X_2 + 24,7X_3 + 20X_1X_2 + 8,2X_1X_3 + 13X_2X_3$ $\sigma_{1300} = 19,5X_1 + 23X_2 + 16,4X_3 + 19,4X_1X_2 + 13,4X_1X_3 + 23,6X_2X_3$

* – индекс соответствует температуре термообработки

термообработанных при 350 °С, показал, что область зерновых составов заполнителя, обеспечивающих формирование прочной структуры бетона и достижение максимальных значений предела прочности при сжатии образцов – 31,6 Н/мм², соответствует следующему соотношению фракций заполнителя: 10 – 0,5 мм – 35,1 – 38,2 %, 0,5 – 0,088 мм – 18,6 – 22,5 %; менее 0,088 мм – 41,3 – 43,7 % (рис. 1, а). При этом кажущаяся плотность бетонных образцов составляет 1,76 г/см³, а открытая пористость изменяется в узких пределах – 31,67 – 32,33 % (рис. 1, в, д). Изменение характера изолиний образцов (рис. 1, а, в, д), указывает на то, что

необходимое сочетание свойств низкоплотного бетона обеспечивается соотношением фракций заполнителя 10 – 0,5 мм : 0,5 – 0,088 мм – 1 ÷ 1,7 – 1 ÷ 1,9, менее 0,088 мм : 0,5 – 0,088 мм – 1 ÷ 1,9 – 1 ÷ 2,2. Отмечено некоторое снижение прочности и пористости образцов после обжига при 1300 °С (рис. 1, б, г, е). Образцы, сформованные из бетонных смесей с зерновым составом заполнителя: 10 – 0,5 мм – 34,3 – 36,3 %; 0,5 – 0,088 мм – 20,8 – 22,05 %; < 0,088 мм – 42,6 – 45,2 %, отличались высокой механической прочностью – 26,6 Н/мм², кажущейся плотностью 1,78 г/см³ и пористостью – 32 %.

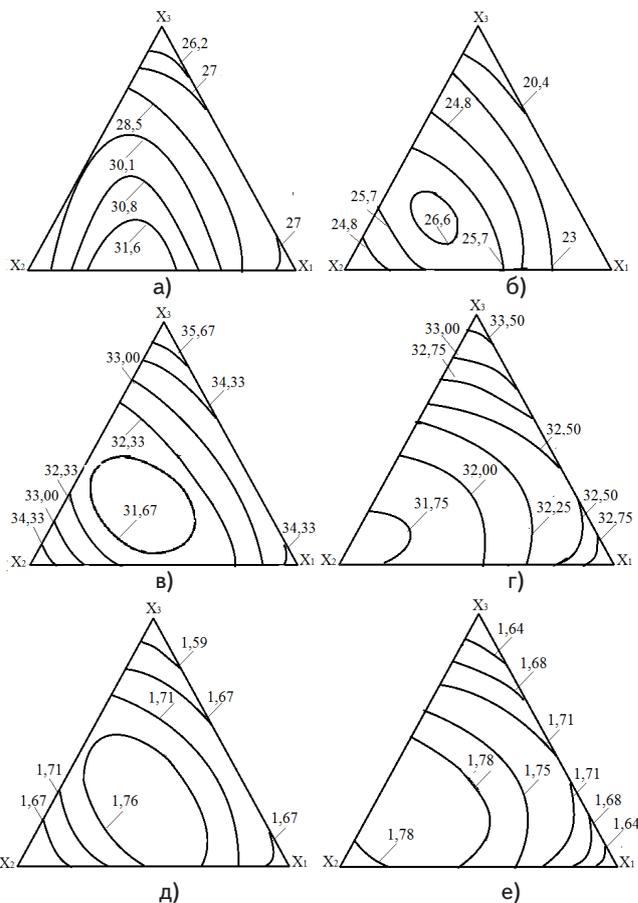


Рис. 1. Изолинии предела прочности при сжатии (а, б), открытой пористости (в, г), кажущейся плотности (д, е) низкоплотного бетона после термообработки при 350 °С (а, в, д) и 1300 °С (б, г, е)

На основании сопоставительного анализа влияния вещественного и зернового состава заполнителя, обеспечивающего требуемое сочетание свойств низкоплотного бетона после низкотемпературной термообработки и обжига, установлена область оптимальных составов бетонных смесей, содержащих цемент и микрокремнезем: фр. 10 – 0,5 мм – 35 – 36,3 %; фр. 0,5 – 0,088 мм – 20,8 – 22,1 %; фр. < 0,088 мм – 42,6 – 45,2 %.

На предприятии ПАТ «Великоанадольский огнеупорный комбинат» была изготовлена опытная партия двухслойных бетонных изделий сложной конфигурации в количестве 5 т. Изделия состояли из рабочего

слоя – уплотненного низкоцементного шамотного бетона [11, 12] и теплоизоляционного – низкоплотного шамотного бетона разработанного состава. При изготовлении уплотненного шамотного бетона использовали шамот фр. 6 – 0,088 и менее 0,088 мм. Результаты определения показателей свойств различных слоев бетонных изделий после низкотемпературной термобработки и обжига приведены в табл. 3.

Таблица 3
Показатели свойств низкоцементных бетонов

Наименование показателей	Уплотненный бетон*	Низкоплотный бетон*
Кажущая плотность, г/см ³	<u>2,11 – 2,12</u> 2,18 – 2,20	<u>1,72 – 1,76</u> 1,78 – 1,80
Открытая пористость, %	<u>20,40 – 21,0</u> 16,00 – 16,70	<u>31,25 – 32,50</u> 31,52 – 32,18
Предел прочности при сжатии, Н/мм ²	<u>39,80 – 40,50</u> 58,00 – 60,50	<u>31,80 – 32,00</u> 26,4 – 27,00
Линейная усадка, %	<u>0,08 – 0,1</u> 0,53 – 0,6	<u>0,08 – 0,1</u> 0,35 – 0,40
Термостойкость (1300 °С – вода), теплосмены	более 25	–
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)		
– при 350 °С	<u>1,1205 – 1,1306</u> 0,8324 – 0,8445	<u>0,8012 – 0,8107</u> 0,7205 – 0,7405
– при 650 °С	<u>1,4568 – 1,4703</u> 1,2956 – 1,3048	<u>0,5860 – 0,5979</u> 0,7260 – 0,7314

* – числитель – температура термообработки образцов 350 °С, знаменатель – 1300 °С

Петрографические исследования микроструктуры различных слоев термообработанного опытного изделия выявили их структурные отличия (рис. 2).

Микроструктура слоя из низкоплотного бетона (рис. 2, а) представлена крупными зернами пористого заполнителя изометричной неправильной формы размером 0,2 – 8 мм и более и тонкозернистой связующей массой. Зерна заполнителя характеризуются пористой структурой с порами неправильной удлиненной формы размером от 15 – 60 мкм до 100 – 600 мкм (максимум 1300 мкм). В связующей массе присутствует тонкодисперсный заполнитель – шамот; встречаются зерна кварца размером до 40 – 150 мкм. Основная масса связки бесцветная, изотропная и слабоанизотропная представлена тонкодисперсными зернами шамота и тонкокристаллической гидратированной массой в виде кристаллов алюминатов кальция в пленках гидратных форм алюминатов кальция.

Структура слоя уплотненного бетона (рис. 2, б) отличается плотным контактом заполнителя со связкой. На зернах шамота наблюдаются мелкие изометричные поры размером 4 – 5 мкм (максимум до 40 мкм). Мелкие изометричные поры неправильной формы размером от 4 – 5 мкм до 20 мкм и реже крупные поры округлой формы с размером 100 – 300 мкм располага-

ются в связующей массе, минералогический состав и структура которой аналогична связующей низкоплотного слоя. Минералогический состав бетонов различных слоев изделия представлен муллитом, кварцем в пленках метакристобалита, аморфной стеклофазой, алюминатами кальция и их гидратами.

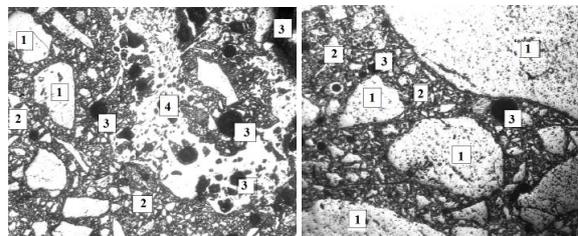


Рис. 2. Микроструктура низкоплотного (а) и уплотненного слоя (б) бетонного изделия: 1 – шамот, 2 – связка, 3 – поры (черное), 4 – пористый заполнитель

Термообработанные двухслойные бетонные изделия были испытаны в футеровке зоны обжига вращающейся печи, предназначенной для обжига каолина с максимальной температурой 1480 – 1500 °С. Во время плановых остановок печи через 6 и 12 месяцев эксплуатации проводился визуальный осмотр поверхности футеровки. Отсутствие образования гарнисажа, сколов, термических и усадочных трещин на поверхности футеровки, выложенной опытными бетонными изделиями, свидетельствовало об их высокой механической прочности, термической и химической стойкости. В процессе эксплуатации печи с футеровкой опытными изделиями «прогары» кожуха не наблюдались, что свидетельствует о теплоизолирующих свойствах двухслойных бетонных изделий и снижении потерь тепла. Эксплуатация печи с опытной футеровкой зоны обжига продолжается по настоящее время.

4. Выводы

С использованием симплекс-решетчатого метода планирования эксперимента исследовано влияние вещественного и зернового состава заполнителя на показатели свойств шамотного низкоплотного бетона. Установлено оптимальное соотношение различных фракций зернистого заполнителя (брака и лома легковесных изделий) и тонкодисперсного заполнителя (шамота) в составе бетонной смеси, обеспечивающих формирование прочной структуры бетона.

В условиях промышленного производства изготовлена опытная партия двухслойных низкоцементных бетонных изделий, состоящих из рабочего слоя – уплотненного шамотного бетона и теплоизоляционного слоя – низкоплотного шамотного бетона разработанного состава, и проведены испытания опытных изделий во вращающейся печи для обжига каолина. На основании результатов промышленных испытаний бетонных изделий с градиентной пористостью установлены их высокие термочностные и теплоизоляционные свойства, стойкость к абразивному и химическому износу, деформационным нагрузкам, что позволяет рекомендовать эти изделия для использования в элементах футеровки вращающихся печей с температурой службы до 1500 °С.

Литература

1. Хорошавин Л.Б. Магнезиальные огнеупоры [Текст]: справ. изд. / Л.Б. Хорошавин, В.А. Переплицын, В.А. Кононов. – М: Интермет Инжиниринг, 2001 – 576 с.
2. Чусовитина Т.В. Тенденции развития огнеупоров для вращающихся печей [Текст] / Т.В. Чусовитина, Ю.К. Малышкин, Л.С. Беклемешева // Огнеупоры. – 1990. – №12. – С. 46 – 48.
3. Гончаров Ю.И. Двухслойный теплоизоляционный огнеупор [Текст] / Ю.И. Гончаров, Л.А. Терсенова, Ю.Т. Альков // Огнеупоры. – 1993. – №6. – С. 33 – 34.
4. Примаченко В.В. Применение огнеупорных бетонов в футеровке участков вращающихся печей [Текст] / В.В. Примаченко, Л.А. Бабкина, Л.Н. Солошенко // Металлургия и горнорудная промышленность. – 2002. – №6. – С. 64.
5. Mr Deveshwar U.C. Refractory challenges from cement industry [Text] / Mr U.C. Deveshwar, dr. I.N. Chakraborty // Proceedings of the World refractory congress. – 2004. – 27 – 29 June. – Singapore. – P. 1 – 14.
6. Аксельрод Л.М. Неформованные огнеупоры в футеровке вращающейся печи [Текст] / Л.М. Аксельрод, В.С. Комаров, В.Т. Хадыев // Цемент и его применение. – 2008. – № 6. – С. 72 – 74.
7. Пивинский Ю.Е. Неформованные огнеупоры нового поколения [Текст] / Ю.Е. Пивинский, О.Г. Усыаров // Новые огнеупоры. – 2006. – №1. – С. 35 – 41.
8. Кащеев И.Д. Неформованные огнеупоры: справоч. изд. в 2 т. / И.Д. Кащеев, М.Г. Ладыгичев, В.Л. Гусовский. – М.: Тепло-техник, 2004. – Т. 2: Свойства и применение неформованных огнеупоров. – 2004. – 440 с.
9. Примаченко В.В. Исследование физико-механических свойств, фазового состава и микроструктуры гексаалюминаткальциевого легковеса [Текст] / В.В. Примаченко, В.В. Мартыненко, Л.А. Дергапуцкая // Сб. науч. тр. ОАО “УкрНИИО им. А.С. Бережного”. – Харьков: Каравелла, 2001. – №.101. – С. 3 – 6.
10. Примаченко В.В. Влияние вида глинозема на свойства гексаалюминаткальциевого заполнителя и теплоизоляционного бетона на его основе [Текст] / В.В. Примаченко, В.В. Мартыненко, Н.М. Казначеева, В.В. Рубанова // Сб. науч. тр. ОАО “УкрНИИО им. А.С. Бережного”. – Харьков: Каравелла, 2008. – №.108. – С. 23 – 30.
11. Шевцов Р.Н. Влияние зернового состава заполнителя на свойства низкоцементных огнеупорных бетонов [Текст] / Р.Н. Шевцов, И.Д. Рябов, Л.Д. Пилипчатин, Ю.А. Онасенко // Вестник Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”. – 2010. – №65. – С. 44 – 48.
12. Шевцов Р.Н. Влияние количества высокоглиноземистого цемента на свойства низкоцементного бетона на шамотном заполнителе [Текст] / Р.Н. Шевцов, И.Д. Рябов, Л.Д. Пилипчатин, Ю.А. Онасенко // Вопросы химии и химической технологии. – 2011. – № 1. – С. 141 – 143.

Abstract

Multilayer lining consists of dense refractories for a working layer and insulating refractories and is used for decreasing heat losses through the rotary kiln shell. The production of refractory brick with gradient porosity functioning as multilayer lining may be made using the concretes. In this article the results of low-dense fireclay concrete development with the use of fine-grain fireclay aggregate and porous filler (reject and light scrap of light-weight refractories) for the insulating layer of concrete shape are given. The influence of substantial and grain composition of the aggregate on the properties of low-cement fireclay concrete has been investigated with the use of simplex method of experimental planning. The best correlation of porous aggregate and fine-grain fireclay aggregate in the content of concrete mixture is found which ensure the formation of strong structure of low-dense concrete. Two-layer concrete shapes with gradient porosity, consisting of dense and low-dense concrete have been produced at a plant. Industrial tests of two-layer concrete shapes with gradient porosity in roasting zone of rotary kiln for kaolin burning showed their high service properties

Keywords: lining, rotary kiln, insulating concrete, aggregate, granularity