

¹ Программа по материаловедению и инжинирингу, Федеральный университет штата Санта-Катарина, г. Флорианополис, Бразилия

² Факультет химической технологии Федерального университета штата Санта-Катарина, г. Флорианополис, Бразилия

УДК 666.762.11:666.3/7.002.68

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УТИЛИЗИРОВАННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ОГНЕУПОРОВ

Представлена технология изготовления трехкомпонентного огнеупорного материала с использованием отходов предприятия в качестве основных компонентов. Подбор состава смеси и анализ поверхности отклика были применены для уменьшения объема лабораторных работ посредством получения оптимальной области рецептур, в которой достигаются необходимые характеристики конечного продукта. Кроме того, можно улучшить соотношение затраты-выгоды на этапе разработки рецептуры, а также существенно улучшить понимание взаимовлияния в цепочке технология производства – микроструктура – свойства огнеупоров. Среди других сырьевых материалов были использованы отходы производства огнеупорных плит: угольная зола, шлаковый песок, отходы глазури и молотый в бегунах высокоглиноземистый огнеупор. Методика может помочь найти область тройной диаграммы, в которой характеристики продукта соответствуют требованиям, предъявляемым к огнеупорным материалам в службе, таким как линейная усадка и предел прочности при изгибе после обжига. Оптимизированный состав позволил существенно снизить затраты в сравнении с используемыми в настоящее время огнеупорами наряду с вкладом в охрану окружающей среды.

Ключевые слова: вторичное использование отходов, керамические плитки, огнеупоры, подбор состава смеси, трехкомпонентный огнеупор.

ВВЕДЕНИЕ

В нескольких исследованиях представлены предложения по повторному использованию утилизированных материалов как альтернативных в производстве керамики с акцентом на экономические выгоды и охрану окружающей среды. Недавно Пыриков (Pyrikov) и др. обсуждали некоторые аспекты использования огнеупорных материалов и отходов их производства в промышленности [1]. Manfredini и др. изучили повторное использование керамического шлама в производстве керамических плиток [2]. Escardino и др. исследовали возможность утилизации отработанного катализатора из установок крекинга с псевдоожиженным слоем катализатора (FCC — fluidized catalyst cracking), используемых при нефтепереработке, чтобы заменить каолин как сырьевой материал в изготовлении керамической фритты [3]. Dondi и др. повторно использовали отходы компьютерного и телевизионного стекла в производстве глиняных кирпичей и кровельной черепицы [4]. Loryuenyong и др. изучили влияние добавки отходов стекла на физические и механические свойства глиняных кирпичей [5]. Segadães использовал фазовые диаграммы для управления

производством керамики из отходов [6], Pereira и др. подготовили керамические композиции с промышленными отходами и природные субпродукты (natural sub-products) [7]. Menezes и др. оптимизировали содержание отходов в керамических плитках с помощью статистического расчета (statistical design) экспериментальных смесей [8], Junkes и др. на основе фазовых диаграмм разработали рецептуру керамических плиток из минеральных отходов [9].

Различные отходы использовали также для того, чтобы разработать рецептуру огнеупорной керамики. Cheng (Ченг) и др. продемонстрировали возможность получения синтетического форстерита с использованием отходов серпентина [10]. Ribeiro (Рибейру) и др. изучили технологию изготовления образцов огнеупорной керамики на основе муллита однонаправленным сухим прессованием из различных рецептур, которые включают обогащенный Al-шлам как единственный или главный компонент [11]. Conejo и др. изучили рецикллинг MgO–C-огнеупоров из дуговых печей и установок ковш-печь [12]. Arianpour и др. использовали до 30 % переработанных отслуживших огнеупорных изделий, чтобы произвести магнезиальные огнеупоры [13]. Valenza и др. оценили ме-

ханические свойства спеченных отходов, используемых в производстве огнеупорных плит [14]. *Sutcu* и др. производили анортитовые огнеупорные изделия из смеси глины и вторичной бумаги с теплопроводностью приблизительно 0,13 Вт/(м·К) [15], *Bragança* и др. изучили использование золы каменного угля в изоляционном огнеупорном кирпиче [16].

Средства статистического анализа (statistical tools) широко применяются для создания керамических композиций. Когда разрабатывается смесь сырьевых (или вторичных) материалов, концепция подбора состава смеси может быть полезна для количественной оценки влияния соответствующих параметров на специфические свойства. Кроме того, статистический анализ отклонений и графическое представление факторов на поверхности отклика (the effects in a response surface) были использованы для определения оптимизированных составов, включающих вторичные материалы. *Correia* и др. использовали статистический метод, чтобы разработать трехкомпонентную керамику с использованием бракованного агата вместо кварцевого песка [17]. В другой работе *Menezes* и др. [8] использовали статистическое проектирование (design statistical) смесительного оборудования для оптимизации содержания отходов в керамических плитках.

С другой стороны, хотя в производстве керамики применяется преимущественно внутренний рециклинг, библиография обычно имеет отношение к использованию вторичных материалов, полученных за пределами керамического промышленного предприятия. *Nojamberdiev* и др. [18] использовали отходы мусковитового гранита для производства керамических плиток. *Raimondo* и др. [19] изучили влияние стеклянного боя (катодной трубки и экрана ТВ/ПК) на технологические свойства мозаичных керамических плиток.

В настоящей работе путем проектирования состава смеси (mixture design) была составлена рецептура огнеупорных плит [20], после чего они были изготовлены из природного сырья и вторичных материалов, имеющихся на предприятии по производству керамических плиток. Полученные огнеупорные изделия должны были соответствовать требованиям, предъявляемым к подложкам (support parts) для обжига керамических плиток на предприятии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

В работе использовали отходы и первичное сырье бразильской компании по производству керамических плиток. Компоненты перечислены ниже. Из них только глина PR-X и доломитизированный

известняк не относятся к отходам, полученным на данном предприятии. Включение этих компонентов было необходимо, поскольку огнеупорные плиты формовали путем прессования; в связи с этим необходимо было использование пластичной глины. Отходы глазури использовали для активизации спекания при более низких температурах, повышая устойчивость материала после обжига. В данном случае необходимо было найти компромисс между параметрами обработки и условиями применения огнеупорных изделий, которые должны быть пригодны для службы при высоких температурах эксплуатации.

Используемые сырьевые материалы разделены на три группы в соответствии с их функциями в трехкомпонентных составах: огнеупоры, флюс и пластичный материал. Огнеупоры:

- легкая угольная зола: отходы, полученные в результате сгорания угля в печи; удаляются из печных гидроциклонов; количество 210 т/мес;
- шлаковый песок: отходы, полученные в результате сжигания угля в печи, удаляются из-под печи; количество 15 т/мес;
- керамика роликов (rolled ceramic): измельченные (дробление) глиноземистые ролики из печи для обжига глазурованных плиток (breaking of the rolled alumina oven glaze); количество 0,66 т/мес;
- измельченный огнеупор: молотые огнеупоры после использования в туннельной печи, полученные от внешних поставщиков; количество 4,5 т/мес;
- доломитизированный известняк: сырьевой материал на основе карбонатов.

В качестве флюса использовали отходы глазури: оставшаяся на предприятии глазурь (12 т/мес); пластичным материалом служила глина PR-X.

Проектирование эксперимента (experimental design)

Проектирование эксперимента и анализ были проведены с использованием методики проектирования (подбора) состава смеси; этот подход привлек значительное внимание специалистов по керамике в последние годы [17, 21–23]. Данный метод позволяет количественно оценить влияние определенных параметров на специфические свойства, используя анализ отклонений (дисперсии) и графическое представление факторов как контуров на трехосной диаграмме (triaxial diagram).

Отходы классифицируются в соответствии с физическими и химическими характеристиками (огнеупорность, плавкость и пластичность) и могут быть размещены на вершинах трехосной диаграммы.

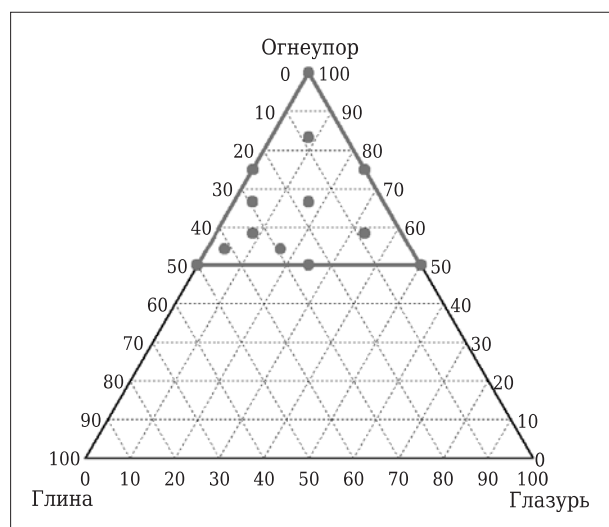


Рис. 1. Симплексное планирование, показывающее псевдокомпонент составов, анализируемых в трехосной диаграмме

Проектирование эксперимента, используемое для смесей, отличается от факторного анализа (*factorial designs*), поскольку свойства смеси определяются долями отдельных компонентов, а не общим количеством. Кроме того, сумма долей различных компонентов в смеси всегда составляет 100 мас. %. Для смеси из q компонентов [24]:

$$\sum_{i=1}^q x_i = 1, \quad (1)$$

где x_i представляет долю i -го компонента на шкале, 100 мас. % соответствуют единице. Существование этого ограничения сужает пространство, пригодное для испытания.

Таблица 1. Состав рецептур, мас. %, полученных проектированием эксперимента со средними точками

Рецептура	Флюс (глазурь)	Глина (пластичный материал)	Огнеупор
1	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	50,00
3	0,00	50,00	50,00
4	0,00	25,00	75,00
5	25,00	0,00	75,00
6	25,00	25,00	50,00
7	16,67	16,67	66,67
8	8,33	8,33	83,34
9	8,33	33,33	58,34
10	33,33	8,33	58,34
11	4,16	29,17	66,67
12	16,66	29,17	54,17
13	4,16	41,67	54,17

Для систем с тремя независимыми факторами представлены все точки, содержащиеся в кубе. Изучение вариантов выхода реакции с x_1 — продолжительностью реакции, x_2 — температурой и x_3 — давлением, например, может быть типичным случаем. Для смеси с тремя компонентами уравнение 1 превращается в следующее:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1. \quad (2)$$

Это уравнение геометрически соответствует равностороннему треугольнику, наложенному на куб. Различные возможные составы представлены точками, принадлежащими треугольнику. Вершины соответствуют чистым компонентам, стороны — двухкомпонентным смесям, в то время как точки, расположенные внутри треугольника, представляют возможные смеси из трех компонентов. Изменения количества заданного компонента в составе смеси могут быть представлены поверхностью отклика, «натянутой» на треугольник. Когда поверхность описывается ее контуром, получается треугольная диаграмма [24].

Подбор состава смеси в этой работе был основан на симплексном центральном размещении, увеличенном на три осевые точки и три точки, выбранные в лучшей области по результатам предварительных испытаний.

На рис. 1 показан псевдокомпонент (*pseudocomponent*), используемый в этой работе, и 13 составов с массовыми долями от 50 до 100 мас. % огнеупорных материалов, от 0 до 50 мас. % глины и от 0 до 50 мас. % отходов глазури. Каждый состав представлен точкой на диаграмме. Как можно видеть, вершина диаграммы соответствует таким огнеупорным материалам, как угольная зола, измельченный огнеупор, шлаковый песок, керамика роликов и доломитизированный известняк. Доля каждого компонента была выбрана пропорционально произведенному его количеству. Доломитизированный известняк (10 мас. %) был введен, чтобы уменьшить линейную усадку. Таким образом, состав огнеупора был следующий, мас. %: шлаковый песок 5,86, угольная зола 82,12, измельченный огнеупор 1,76, керамика роликов 0,26, доломитизированный известняк 10,00. Составы рецептур образцов приведены в табл. 1.

Спрессованные огнеупорные плиты высушивали в течение 3 ч и обжигали в туннельной печи, укладывая их на тележку для обжига, чтобы обеспечить лучшие условия спекания. Огнеупорные плиты нагревали со скоростью 65 °С/ч до достижения 1100 °С. Выдержка при этой температуре 3 ч. По окончании выдержки плиты медленно охлаждали внутри печи до достижения комнатной температуры.

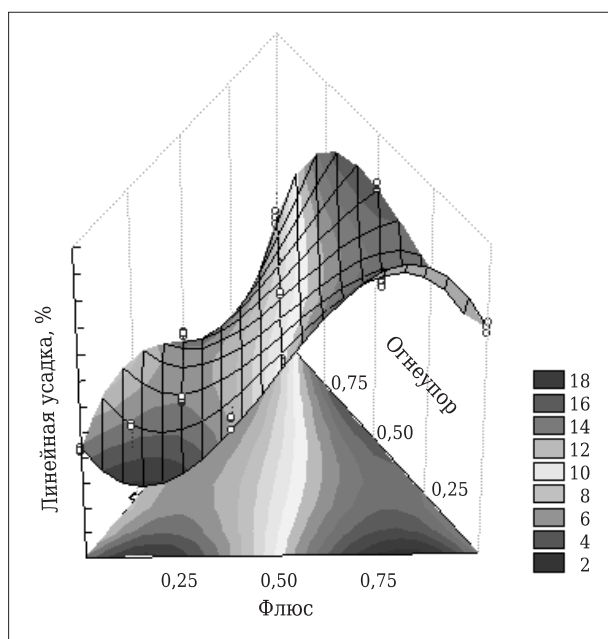


Рис. 2. Изменение линейной усадки в зависимости от содержания огнеупора, пластичного материала и флюса

Свойства огнеупорных материалов в значительной мере определяются условиями их эксплуатации. На срок службы огнеупора влияет наряду с другими факторами химическая стабильность образовавшихся фаз [25]. Механическая прочность и линейная усадка связаны со спеканием материала в процессе производства. Характеристики, которые выбраны для определения в этой работе, следующие:

- линейная усадка, %,
- предел прочности при изгибе сырца, МПа,
- предел прочности при изгибе после обжига, МПа,
- водопоглощение, мас. %,
- кажущаяся плотность, кг/м³.

Линейную усадку измеряли после обжига. Предел прочности при изгибе определяли трехточечным методом. Стандарты NBR 13818 и EN 10545 [26, 27] были использованы как директивы для измерения водопоглощения. Кажущаяся

плотность была определена с использованием принципа Архимеда.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химические характеристики сырьевых материалов

В табл. 2 показан химический состав используемых сырьевых материалов. Среди огнеупорных материалов керамика роликов имеет самое высокое содержание Al_2O_3 , в то время как основной компонент в шлаковом песке, угольной золе и измельченном огнеупоре — SiO_2 . Измельченный огнеупор имеет высокое содержание MgO . Отходы глазури отличаются значительным содержанием щелочей, которые относятся к типичным флюсующим материалам. Пластичный компонент (глина PR-X) показал высокие потери при прокаливании (п.п.п.), что связано главным образом с наличием органического вещества.

Определение параметров огнеупорной плиты

Линейная усадка

В соответствии со статистическими испытаниями была выбрана кубическая модель, чтобы смоделировать изменения линейной усадки. На рис. 2 можно видеть, что линейная усадка тем больше, чем выше содержание глазури в рецептуре, и, наоборот, низкая линейная усадка соответствовала высокому содержанию огнеупора и глины. Рис. 3 показывает, что большое значение имели флюс, огнеупор, пластичный материал и взаимодействия BC, AB(A–B), ABC, AB и AC(B–C). Поэтому, когда изменяется содержание этих переменных, наблюдаются существенные изменения линейной усадки.

Предел прочности при изгибе сырца

Анализ предела прочности при изгибе сырца показал, что при большой доле глины получают высокое значение этого показателя (рис. 4). Высокая пластичность сопутствует изделиям с большей механической прочностью [28–30]. С другой стороны, имеются результаты исследований, сви-

Таблица 2. Химический состав сырьевых материалов, используемых в работе, мас. %

Материал	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	MgO	CaO	BaO	TiO_2	ZrO_2	Fe_2O_3	ZnO	P_2O_5	SO_3	П.п.п.
Огнеупорные ролики	34,98	59,37	0,50	1,28	2,59	0,20	0,00	0,33	0,00	0,69	0,00	0,04	0,00	0,00
Шлаковый песок	65,48	20,73	0,21	2,07	0,46	3,08	0,00	1,03	0,00	3,78	0,00	0,06	1,09	2,00
Угольная зола	55,34	27,14	0,35	3,01	1,29	2,33	0,00	1,43	0,46	3,97	0,00	0,08	0,39	4,20
Измельченный огнеупор	50,92	30,35	0,93	1,52	5,21	2,44	0,00	1,08	3,19	2,06	0,00	0,06	0,52	1,70
Отходы глазури	54,51	7,93	1,99	3,54	2,41	9,06	1,12	0,09	11,90	0,45	5,29	0,00	0,00	1,70
Остаточная глина	44,23	37,45	0,00	0,24	0,25	0,19	0,00	2,03	0,00	1,05	0,00	0,03	0,00	14,50
Доломитизированный известняк	13,30	2,75	0,16	0,44	17,9	30,53	—	0,11	—	0,99	—	0,03	—	33,8

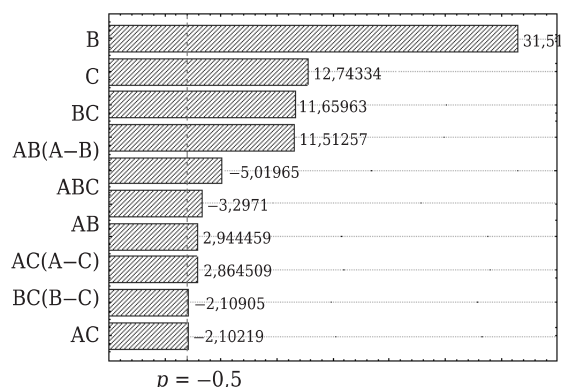


Рис. 3. Диаграмма Парето линейной усадки (кубическая модель): А — пластичный материал; В — флюс; С — огнеупор

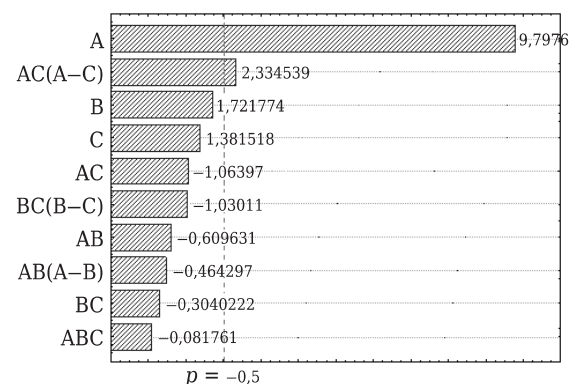


Рис. 5. Диаграмма Парето прочности при изгибе сырца (кубическая модель): А — пластичный материал; В — флюс; С — огнеупор

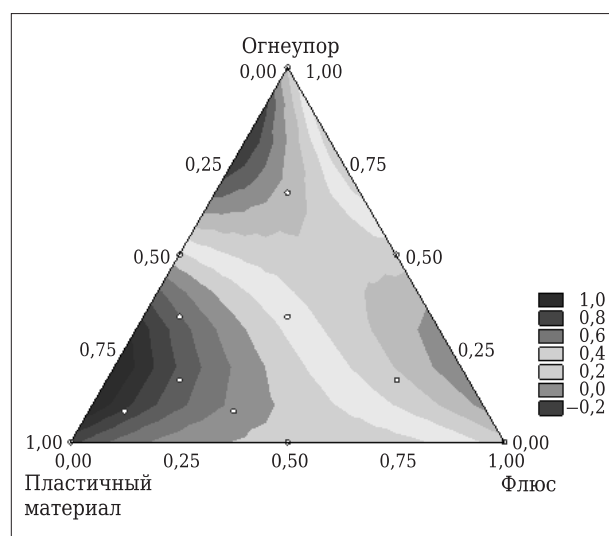


Рис. 4. Поверхность отклика предела прочности при изгибе сырца (кубическая модель)

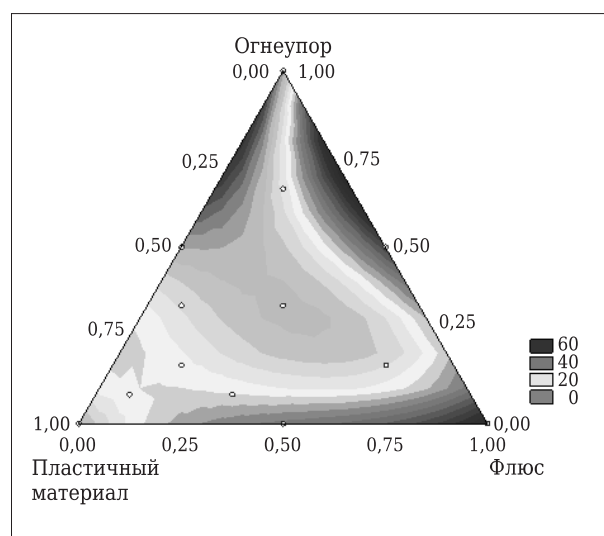


Рис. 6. Изображение в изолиниях (контурное изображение) кубической модели, соответствующее пределу прочности при изгибе после обжига

детельствующие о том, что фактор упаковки частиц может изменить это положение [23].

Исследованиями установлено, что только пластичный материал (глина) существенно влияет на прочность при изгибе сырца. В связи с этим изменение доли пластичного материала приводит к изменению прочности сырца.

Предел прочности при изгибе после обжига

Поверхность отклика для прочности при изгибе после обжига (рис. 6) показала, что наибольшие значения были достигнуты при более высокой доле флюса, что связано с большим содержанием в нем щелочей (табл. 2). Диаграмма Парето для этой переменной свидетельствует о существенном влиянии флюса и взаимодействий ABC (рис. 7). Жидкая фаза в процессе спекания способствует уплотнению структуры и, следовательно, повышению прочности при изгибе [31].

Водопоглощение

Кубическая модель была также наиболее пригодна для описания водопоглощения. На рис. 8 можно увидеть, что меньшее водопоглощение связано с более высоким содержанием флюса вследствие усиленного уплотнения. Подобные результаты были также получены Correia и др. [32]. Для этой переменной диаграмма Парето показала, что огнеупор, глина и флюс — важные компоненты. На рис. 9 представлена проверка достоверности этой модели. Точки на рисунке расположены близко к прямой линии, поэтому распределение можно рассматривать как нормальную модель.

Кажущаяся плотность

Поверхность отклика на рис. 10 показывает линии уровня (изолинии) для кажущейся плотности в соответствии с кубической моделью. Более высокая плотность композиций наблюдалась при

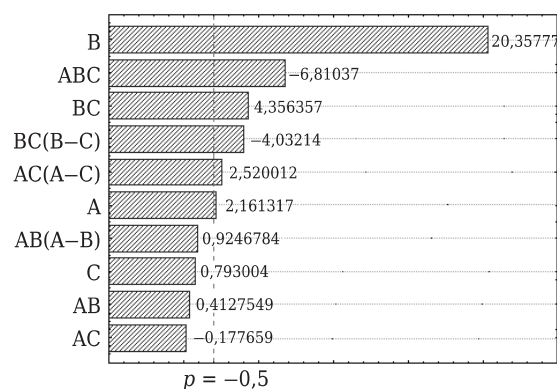


Рис. 7. Диаграмма Парето предела прочности при изгибе после обжига: А — пластичный материал; В — флюс; С — огнеупор

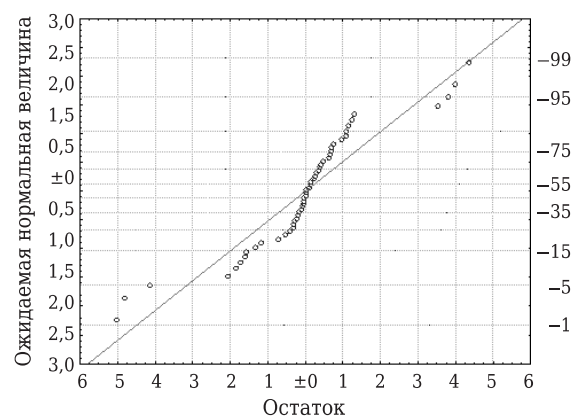


Рис. 9. Проверка достоверности кубической модели для изменяющегося водопоглощения

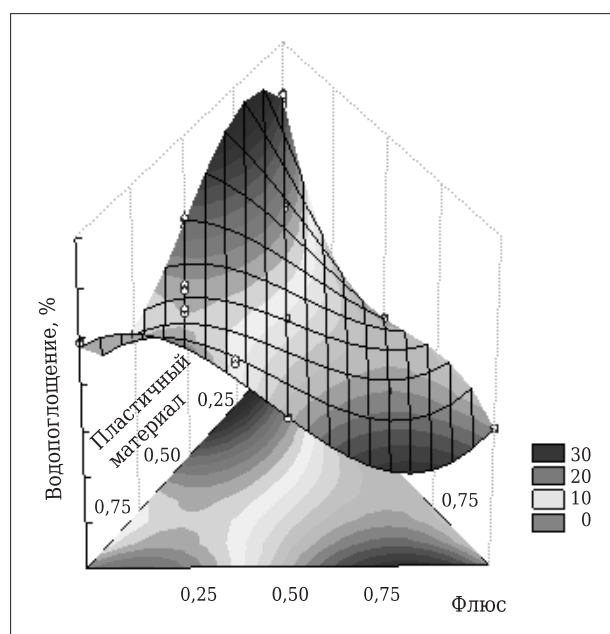


Рис. 8. Водопоглощение для изучаемого псевдокомпонента

увеличенном содержании флюса в рецептуре, а более низкая плотность — при повышенном содержании огнеупора и глиняных фракций. Высокая плотность может быть связана с лучшим спеканием, связанным с жидкой фазой, образующейся в процессе спекания. Следовательно, это тенденция достижения высокой кажущейся плотности при высоком содержании флюса.

На рис. 11 показана проверка достоверности кубической модели. График представляет прогнозируемые значения в зависимости от остатков. Не наблюдали тенденцию изменения с уровнем плотности, тем самым подтверждая статистическую модель.

Рентгеновское исследование спектра

Состав 13 показал лучшие результаты среди изученных рецептов. Формирующиеся в этом образ-

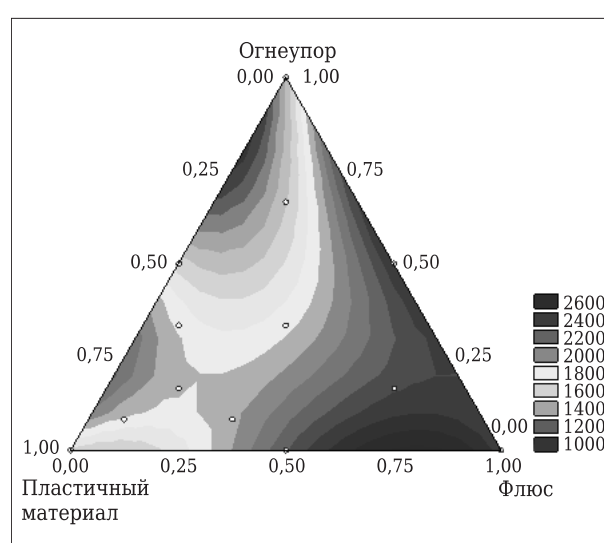


Рис. 10. Поверхность отклика кубической модели, соответствующей кажущейся плотности

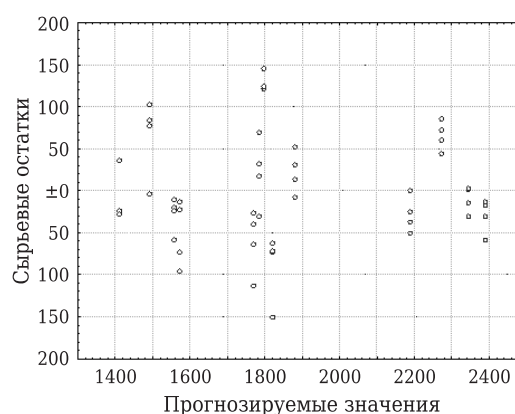


Рис. 11. Проверка достоверности кубической модели для изменяющейся кажущейся плотности

це фазы определяли рентгеновской дифракцией (рис. 12). Анализом выявлена кристаллическая структура, содержащая кварц, муллит, анортит и кордиерит.

Таблица 3. Сравнение технических характеристик

Показатели	Огнеупор	
	предшествующий	новый
Линейная усадка, %	6,15±0,30	4,93±0,15
Предел прочности при изгибе после обжига, МПа	17,22±2,40	20,00±1,76
Предел прочности при изгибе сырца, МПа	0,71±0,22	1,11±0,06
Водопоглощение, мас. %	11,82±2,83	11,40±1,46
Кажущаяся плотность, кг/м ³	2021±24,28	1930±13,30

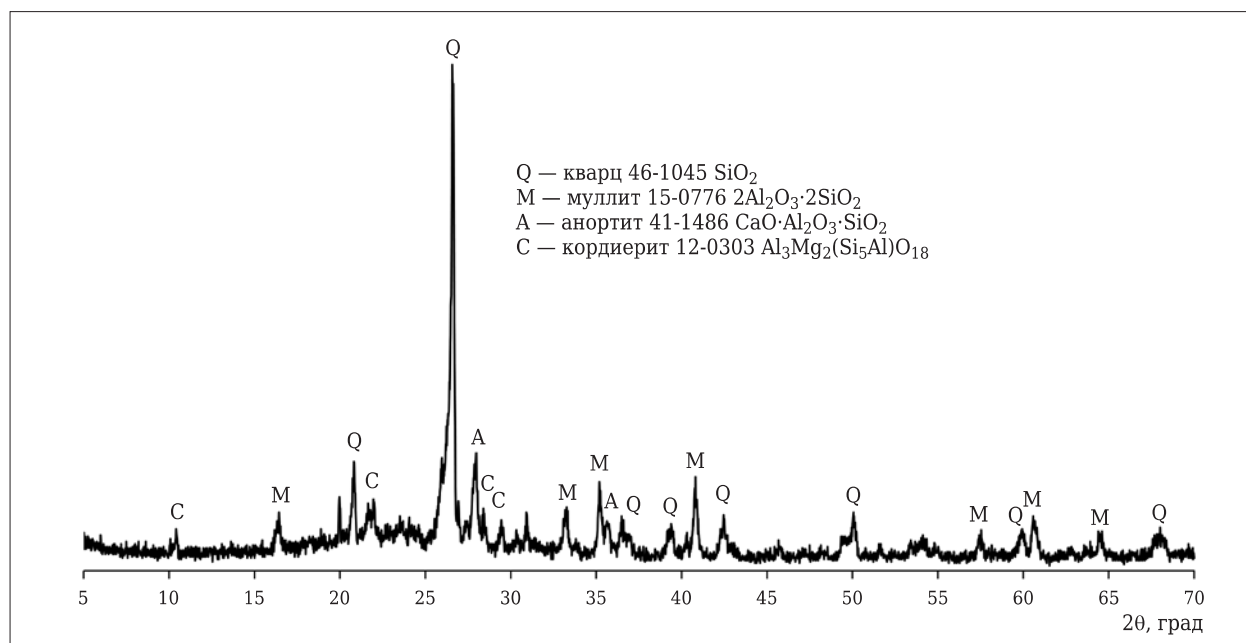


Рис. 12. Результаты рентгеновской дифракции для образца 13

Сравнение разных видов продукции

Лучший среди полученных в этой работе состав, который соответствует огнеупорным плитам, используемым в настоящее время компанией, представлен в табл. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенной работе была подтверждена возможность использования утилизированных на предприятии материалов в производстве трехкомпонентных огнеупоров. Кроме того, можно заключить следующее.

- Применение технологии проектирования (подбора состава) смеси к трехкомпонентным керамическим композициям стало важным инструментом, который облегчает интерпретацию результатов лабораторных испытаний.

- Используемые вторичные материалы (шлаковый песок, керамические ролики, угольная зола и измельченный огнеупор) имеют высокие огнеупорные характеристики и пригодны для изготовления огнеупорных плит.

- Все рецептуры с высоким содержанием отходов глазури показали большую линейную усадку, низкое водопоглощение, повышенную механическую прочность после спекания и высокую кажущуюся плотность в результате образования жидкой фазы во время спекания, что связано со значительным содержанием щелочей в этих отходах.

- Согласно результатам рентгеноструктурного анализа, состав 13 содержал такие кристаллические фазы, как кварц, муллит, анортит и кордиерит, которые регулярно присутствуют в огнеупорной продукции.

- Все образовавшиеся кристаллические фазы характеризуются высокой температурой плавления, которая обеспечивает огнеупорность, необходимую для производимых огнеупоров.

- Для изученных переменных образец 13 показал оптимизированные характеристики в сравнении со стандартной огнеупорной плитой. Снижение затрат было достигнуто путем использования материала, ранее рассматриваемого как отходы.

● Вследствие использования утилизированных керамических материалов в производстве трехкомпонентных огнеупоров проведенная работа способствовала экономии природных ресурсов в результате снижения добычи природного сырья, внося тем самым вклад в защиту окружающей среды.

Библиографический список

1. **Pyrikov, A.** Certain aspects in the use of refractory materials and their waste products in industry / A. Pyrikov, S. Vil'danov, A. Likhodievskii // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2010. — Vol. 51, № 2. — P. 126.
2. **Manfredini, T.** The recycling of ceramic sludges in the production process: An option for ceramic tile factories to reach zero pollution / T. Manfredini [et al.] // *Environmental Technology*. — 1991. — Vol. 12, № 10. — P. 927.
3. **Escardino, A.** Utilizing the used catalyst from refinery fcc units as a substitute for kaolin in formulating ceramic frits / A. Escardino, J. L. Amoros, A. Moreno, E. Sanchez // *Waste Management & research*. — 1995. — Vol. 13, № 5. — P. 569.
4. **Dondi, M.** Recycling PC and TV waste glass in clay bricks and roof tiles / M. Dondi, G. Guarini, M. Raimondo [et al.] // *Waste Management*. — 2009. — Vol. 29, № 6. — P. 1945.
5. **Loryuenyong, V.** Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks / V. Loryuenyong, T. Panyachai, K. Kaewsimork [et al.] // *Waste Management*. — 2009. — Vol. 29, № 10. — P. 2717.
6. **Segadães, A. M.** Use of phase diagrams to guide ceramic production from wastes / A. M. Segadães // *Advances in Applied Ceramics*. — 2006. — Vol. 105, № 1. — P. 46.
7. **Raupp-Pereira, F.** Ceramic formulations prepared with industrial wastes and natural sub-products / F. Raupp-Pereira, D. Hotza, A. M. Segadães, [et al.] // *Ceramics International*. — 2006. — Vol. 32, № 2. — P. 173.
8. **Menezes, R. R.** Optimization of wastes content in ceramic tiles using statistical design of mixture experiments / R. R. Menezes [et al.] // *J. Eur. Ceram. Soc.* — 2008. — Vol. 28, № 16. — P. 3027.
9. **Junkes, J. A.** Ceramic Tile Formulations from Industrial Waste / J. A. Junkes, M. A. Carvalho, A. M. Segadães [et al.] // *Interceram*. — 2011. — Vol. 60, № 1. — P. 36.
10. **Cheng, T. W.** A study of synthetic forsterite refractory materials using waste serpentine cutting / T. W. Cheng, Y. C. Ding, J. P. Chiu // *Minerals Engineering*. — 2002. — Vol. 15, № 4. — P. 271.
11. **Ribeiro, M. J.** Recycling of Al-rich industrial sludge in refractory ceramic pressed bodies / M. J. Ribeiro, D. U. Tulyaganov, J. M. Ferreira [et al.] // *Ceramics International*. — 2002. — Vol. 28, № 3. — P. 319.
12. **Conejo, A. N.** Recycling MgO–C refractory in electric arc furnaces / A. N. Conejo, R. G. Lule, F. Lopéz [et al.] //

* * *

Авторы признательны за финансовую поддержку, полученную от Бразильского исследовательского агентства (Brazilian Research Agency CAPES — Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) в виде гранта Ph. D. grant (M. Dal Bó).

- Resources, Conservation and Recycling. — 2006. — Vol. 49, № 1. — P. 14.
13. **Arianpour, F.** Characterization, microstructure and corrosion behavior of magnesia refractories produced from recycled refractory aggregates / F. Arianpour, F. Kazemi, F. G. Fard // *Minerals Engineering*. — 2010. — Vol. 23, № 3. — P. 273.
14. **Valenza, F.** Sintering of waste of superalloy casting investment shells as a fine aggregate for refractory tiles / F. Valenza [et al.] // *Ceramics International*. — 2010. — Vol. 36, № 2. — P. 459.
15. **Sutcu, M.** Production of anorthite refractory insulating firebrick from mixtures of clay and recycled paper waste with sawdust addition / M. Sutcu, S. Akkurt, A. Bayram [et al.] // *Ceramics International*. — 2012. — Vol. 38, № 2. — P. 1033.
16. **Bragança, S.** Use of mineral coal ashes in insulating refractory brick / S. Bragança, A. Zimmer, C. Bergmann // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2008. — Vol. 49, № 4. — P. 320.
17. **Correia, S. L.** Effect of quartz sand replacement by agate rejects in triaxial porcelain / S. L. Correia, G. Diensmann, M. V. Folgueras [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. — 2009. — Vol. 163, № 1. — P. 315.
18. **Hojamberdiev, M.** Utilization of muscovite granite waste in the manufacture of ceramic tiles / M. Hojamberdiev, A. Eminov, Y. Xu // *Ceramics International*. — 2011. — Vol. 37, № 3. — P. 871.
19. **Raimondo, M.** Effect of waste glass (TV/PC cathodic tube and screen) on technological properties and sintering behaviour of porcelain stoneware tiles / M. Raimondo [et al.] // *Ceramics International*. — 2007. — Vol. 33, № 4. — P. 615.
20. **Lazić, Ž. R.** Design of experiments in chemical engineering: a practical guide / Ž. R. Lazić. — John Wiley & Sons, 2006.
21. **Luz, A. P.** Use of glass waste as a raw material in porcelain stoneware tile mixtures / A. P. Luz, S. Ribeiro // *Ceramics International*. — 2007. — Vol. 33, № 5. — P. 761.
22. **Nardi, J. V.** Enhancing the properties of ceramic products through mixture design and response surface analysis / J. V. Nardi, W. Acchar, D. Hotza // *J. Eur. Ceram. Soc.* — 2004. — Vol. 24, № 2. — P. 375.
23. **Correia, S. L.** Using statistical techniques to model the flexural strength of dried triaxial ceramic bodies /

S. L. Correia, K. A. S. Curto, D. Hotza [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2004. — Vol. 24, № 9. — P. 2813.

24. **Neto, B. d. B.** Planejamento e otimização de experimentos / B. d. B. Neto, I. S. Scarminio, R. E. Bruns ; 2ª, Ed. — Unicamp, Campinas — Sro Paulo, 2001.

25. **Bilek, V.** Materiais refratarios para fornos industriais / V. Bilek. — Tupy : Joinville, 1978.

26. ABNT, in Annex C: Ceramic Tiles — Specifications and Test Methods (Brazilian Association for Technical Standards — ABNT, 1997).

27. **ISO**, in Method for determination of water absorption (British Standards Institution — BSI, 1997).

28. **Çelik, H.** Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry / H. Çelik // Applied Clay Science. — 2010. — Vol. 50, № 2. — P. 245.

29. **Barzegar, A. R.** Tensile strength of dry, remoulded soils as affected by properties of the clay fraction /

A. R. Barzegar, J. M. Oades, P. Rengasamy [et al.] // Geoderma. — 1995. — Vol. 65, № 1–2. — P. 93.

30. **Monteiro, S. N.** Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil / S. N. Monteiro, C. M. F. Vieira // Applied Clay Science. — 2004. — Vol. 27, № 3/4. — P. 229.

31. **Rahaman, M.** / M. Rahaman // Ceramic Processing and Sintering. — 2003. — Vol. 2. — Basel : Marcel Dekker Inc. (New York).

32. **Correia, S. L.** Simultaneous optimization of linear firing shrinkage and water absorption of triaxial ceramic bodies using experiments design / S. L. Correia, D. Hotza, A. M. Segadães // Ceramics International. — 2004. — Vol. 30, № 6. — P. 917. ■

Получено 15.12.12

© Пер. **И. Г. Очагова**

(ОАО «Черметинформация»), 2013 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



ТЕРМООБРАБОТКА

Седьмая международная специализированная выставка

Единственная в России
выставка термического
оборудования и технологий

10 - 12 сентября 2013

Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр», павильон 5

11 сентября

Международная конференция
«ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ТЕРМООБРАБОТКИ»

Разделы выставки:

- ▶ Промышленные печи: муфельные, вакуумные, плавильные, шахтные, камерные, электропечи
- ▶ Индукционный нагрев: ТВЧ продукция, индукционные печи
- ▶ Оборудование для химико-термической обработки: азотирования, цементации и т.д.
- ▶ Закалочное оборудование, масла и среды
- ▶ Лабораторные печи, сушильные шкафы

- ▶ Оснастка для термического оборудования
- ▶ Размерная и поверхностная обработка: формообразование, напыление
- ▶ Автоматизация термообработки, системы управления, контроль качества, теплотехнические измерения
- ▶ Энергосберегающие технологии термических производств

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ И ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ - Специальный раздел в рамках выставки

- ▶ Магнезиальные
- ▶ Корундовые

- ▶ Циркониевые
- ▶ Кремнеземистые

- ▶ Корундографитовые
- ▶ Окисные

- ▶ Алумосиликатные
- ▶ Карбидкремниевые

- ▶ Бескислородные

Информационная поддержка:





Организатор: **ООО «Выставочная компания «Мир-Экспо»** | Россия, 115533, Москва, проспект Андропова, 22

Тел./факс: 8 499 618 05 65, 8 499 618 36 83 | info@htexporus.ru | www.htexporus.ru