Стеклокерамический композит с мультифункциональной колеманитовой добавкой

Н. Ф. Жерновая, Е. А. Дороганов, В. С. Бессмертный, Е. С. Дорохова, Ф. Е. Жерновой, Н. М. Здоренко, И. А. Изотова

Исследовано влияние колеманита на технологию и технические свойства облицовочных стеклокерамических материалов, получаемых спеканием из масс с высоким содержанием стекольного невозвратного боя. Колеманит проявил себя как мультифункциональная добавка, повышая прочность прессовок, интенсифицируя процесс и снижая температуру спекания, формируя пористую структуру получаемых облицовочных материалов. Предложен математический аппарат и графическое обеспечение (набор номограмм), позволяющие быстро и просто находить технологические параметры получения материалов с заданными свойствами.

Ключевые слова: колеманит, спекание, вспенивание, пористая структура, математическое моделирование, уравнение регрессии, номограмма, облицовочная плитка.

Введение

Основополагающими принципами развития строительного материаловедения на современном этапе являются: ресурсо- и энергосбережение, технологичность производства и эксплуатации, экологическая безопасность, экономичность при безусловном соблюдении технических требований нормативных документов. Приоритетность указанных направлений соблюдается и при разработке технологии облицовочных стеклокермических плиток на базе вторичного стекольного боя [1, 2]. В состав плитки-композита входит до 80 – 85 % смешанного, не утилизируемого стекольного боя, как в виде стеклогранулята — наполнитель, так и тонкомолотого порошка — составная часть матрицы композита, выполняющая роль плавня. Пластичным компонентом матрицы служит глина. Вследствие высокого содержания стекольного боя и использования легкоплавких глин удовлетворительные технические свойства облицовочных плиток: водопоглощение — не более 7 %, предел прочности на сжатие — свыше 20 МПа, удавалось достичь в процессе обжига прессовок при относительно низких температурах 750 – 775 °С; линейная усадка при этом не превышала 2 %.

Общеизвестно, что добавление боратов в составы керамических масс для облицовочных материалов, как правило, делает их более легкоплавкими, повышает прочность прессовок и готовых плиток, дает возможность использовать более широкий ассортимент глин, что предопределяет возможность повышения эффективности технологического процесса и готовой продукции [3 – 5]. Учитывая вышесказанное, облицовочные стеклокерамические композиции модифицировали путем введении в состав массы колеманита — $Ca_2B_6O_{11}\cdot 5H_2O$, водного бората кальция ($2\,CaO\cdot 3\,B_2O_3\cdot 5\,H_2O$).

Соединения бора имеют предпочтение по следующим причинам:

— бораты плавятся при низких температурах и используются как компоненты флюсов;

— введение B_2O_3 в состав стеклофазы снижает ее вязкость и поверхностное натяжение, уменьшает температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), повышает термостойкость, механическую прочность и химическую устойчивость стекла.

Цель работы — исследование процесса и продуктов спекания материалов в системе “глина – стеклобой – колеманит”, рассматриваемой в качестве базовой основы для получения различного рода облицовочных стеклокерамических материалов.

Материалы и методика эксперимента

Пластичным компонентом сырьевых смесей служила легкоплавкая местная глина, на базе которой

в Белгородской области производят кирпич и черепицу. Химический состав глины, масс. %: SiO_2 — 69,7; Al_2O_3 — 9,9; Fe_2O_3 — 3,85; CaO — 5,5; MgO — 1,22; Na_2O — 1,33; K_2O — 1,62; потери при прокаливании (п.п.п.) — 6,88, число пластичности 21,5 (ГОСТ 9169-75), коэффициент чувствительности к сушке 0,5 (малочувствительная), линейная усадка при сушке 6,7 %. Цвет черепка при обжиге — темно-терракотовый.

Основу сырьевых композиций (до 85 масс. %) составлял смешанный вторичный стекольный бой. Вторичные стеклоотходы формируются в сфере эксплуатации стекол и стеклоизделий и представляют собой, в основном, смесь боя стеклянных бутылок и банок (бесцветных, зеленых, коричневых) и строительного (преимущественно листового) стекла. Химические составы перечисленных типов стекол весьма близки, масс. %: SiO_2 — 69 – 73; Al_2O_3 — 1 – 4; Fe_2O_3 — 0,1 – 0,5; CaO — 7 – 9,5; MgO — 2 – 4,5; Na_2O — 13,5 – 14,5; K_2O — 0,5 – 0,7; SO_3 — 0,2 – 0,5, а, следовательно, высокую степень сходимости имеют значения технологических характеристик (вязкость, поверхностное натяжение) и технических свойств (плотность, ТКЛР, теплопроводность, прочность), что обусловливает возможность использования в композициях стеклобоя любого вещественного состава.

Третий компонент системы — молотый колеманит, порошок светло-серого цвета, поставляемый фирмой Eti Mine Works G.M. (Турция), следующего химического состава, масс. %: SiO_2 — 5,7; B_2O_3 — 36,5; Al_2O_3 — 0,35; CaO — 23,5; MgO — 2,6; Na_2O — 0,3; Fe_2O_3 — 0,05; п.п.п. — 31,0 и дисперсности (рис. 1). Наряду с колеманитом (60 – 95 %) в материале зачастую присутствуют сопутствующие минералы: кальцит-доломит (7 – 20 %) и улексит (2 – 6 %). Согласно сертификату безопасности колеманит молотый отнесен к не опасным веществам.

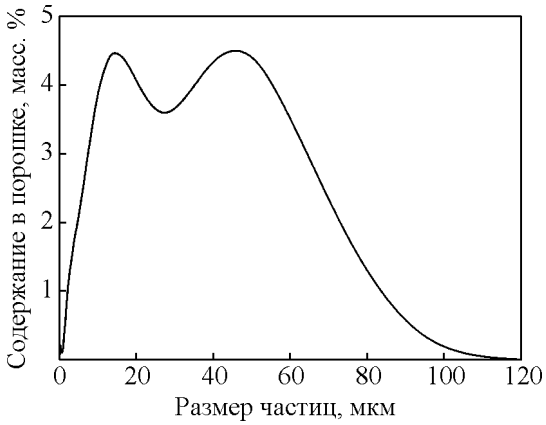


Рис. 1. Дифференциальная функция распределения частиц колеманита по размерам.

В кристаллической структуре колеманита $Ca[B_3O_4(OH)_3]\cdot H_2O$ выделяются бесконечные цепочки из связанных между собой BO_3-треугольников и BO_4-тетраэдров. Одно звено цепочки имеет состав $[B_3O_4(OH)_3]^{-2}$ и построено из двух тетраэдров BO_4 и одного треугольника BO_3, которые, соединяясь общими вершинами, образуют замкнутое кольцо, между цепочками находятся атомы кальция и молекулы воды.

В процессе термообработки колеманита происходит ряд превращений (рис. 2):

— до 400 °С полностью разрушается структура колеманита, что сопровождается его переходом в аморфное состояние;

— при 380 – 400 °С происходит процесс дегидратации колеманита с потерей массы до 20 %;

— далее при 710 °С кольцевая структура аморфного бората кальция (кальций-боратное стекло) претерпевает боратовую перегруппировку с формированием моноборатной структуры и образованием кристаллического соединения — метабората кальция по реакции: $CaO + B_2O_3 = Ca(BO_2)_2$;

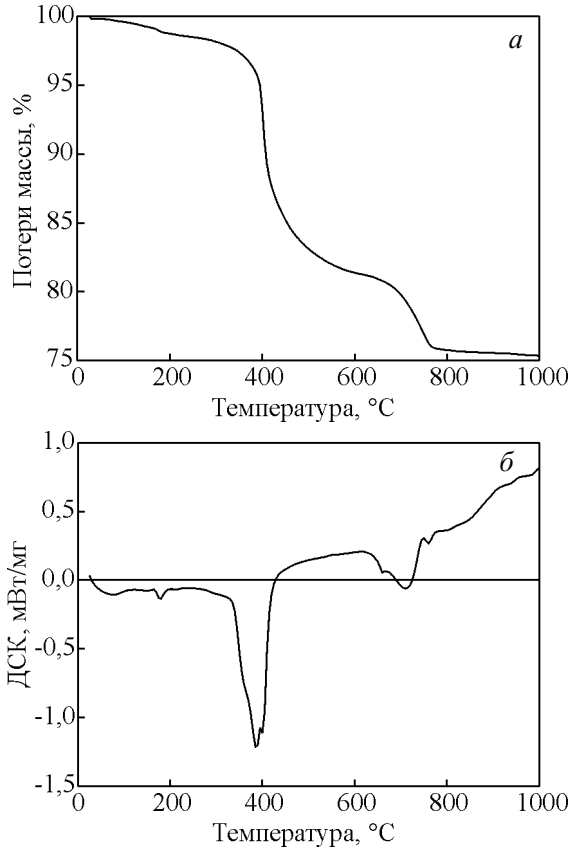


Рис. 2. Термический анализ колеманита: *а* — термогравиметрия (ТГ); *б* — дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК).

Таблица 1

Матрица эксперимента и внешний вид полученных материалов

№	Значение переменных				Функции отклика				
	относительное		натуральное		ΔV, %	ρ, кг/м^3	B, %	П, %	σ, МПа
	X_1	X_2	K, масс. %	$T_{обж}$, °С					
1	–1	–1	5	680	–18,28	1890,9	7,06	13,35	31,30
2	1	–1	15	680	–16,75	1835,6	6,79	12,41	38,78
3	–1	1	5	740	87,86	828,5	1,90	1,61	5,25
4	1	1	15	740	92,82	789,1	5,84	4,54	9,87
5	0	0	10	710	–6,47	1634,3	2,23	3,46	21,20
6	1	0	15	710	36,67	1116,7	2,63	2,95	22,57
7	0	–1	10	680	–7,16	1647,3	12,79	21,18	24,37
8	0	1	10	740	88,76	818,0	3,22	2,69	9,80
9	–1	0	5	710	–23,13	2018,5	0,91	1,87	53,57

— при температурах 680 – 730 °С происходит разложение присутствующего в колеманите кальцита с потерей массы примерно 5 %.

Предполагается, что при обжиге спрессованных смесей исследуемой трехкомпонентной системы “глина – стеклобой – колеманит”, происходящие в колеманите физико-химические процессы будут оказывать существенное влияние как на технологический процесс, так и на структуру и свойства получаемых материалов, а именно:

— вызывать разуплотнение и нарушения целостности прессовок вследствие интенсивного процесса дегидратации колеманита при температурах 380 – 400 °С до начала процесса спекания. В связи с этим в экспериментах использовали колеманит, предварительно обожженный в течение 30 мин при 400 °С;

— привести к снижению температуры спекания материала в результате образования легкоплавких эвтектик с участием B_2O_3. Ранее [3, 4] отмечалось, что при использовании колеманита превращение гидробората кальция в метаборат при обжиге сырьевой композиции создает благоприятные условия для более раннего появления легкоплавких эвтектик и, соответственно, способствует образованию необходимого количества жидкой фазы и интенсификации спекания;

— вызвать образование пористой структуры материала как результат наложения процессов размягчения стекла и декарбонизации присутствующего в колеманите кальцита при температурах 700 – 750 °С.

Для получения достоверных и объективных данных о влиянии колеманита на структуру и свойства стеклокерамических материалов задача решена путем математического планирования двухфакторного эксперимента (табл. 1).

В качестве независимых переменных выбраны: содержание колеманита в сырьевой смеси композита, масс. % — X_1; температура обжига плиток, °С — X_2. Колеманит вводили в смесь взамен стекольного боя. Содержание глины было принято постоянным — 15 масс. %.

Выбранные пределы варьирования количества колеманита — от 5 до 15 %, обоснованы результатами ранее выполненных пробных экспериментов и являются как вполне достаточными для эффективного проявления функциональных особенностей материала, так и экономически целесообразными.

Температурный интервал обжига (680 – 740 °С) интересен с точки зрения совокупности происходящих в нем физико-химических процессов: боратовые перегруппировки в колеманите, декарбонизация кальцита, переход стекла в пластичное состояние, соответствующее процессам спекания, вспенивания, моллирования.

Смеси в системе “глина – стеклобой – колеманит” массой 100 г каждая готовили путем тщательного перемешивания компонентов в фарфоровой ступке вначале в сухом виде, затем с увлажнением. Из полусухой массы (относительная влажность $W_{отн}$ = 7 %) трамбовкой формовали плитки размером 20 × 20 × 7 мм, высушивали и обжигали в течение 30 мин согласно режиму матрицы эксперимента (табл. 1).

Функциями отклика служили свойства обожженных плиток, определяющие технологическую и эксплуатационную надежность облицовочных материалов: ΔV — изменение объема в процессе обжига, %; ρ — кажущаяся плотность, кг/м^3; B — водопоглощение, масс. %; П — кажущаяся (открытая) пористость, об. %; σ — предел прочности на сжатие, МПа. Измерения свойств каждого состава выполняли на 5-и образцах, относительная погрешность не превышала допустимых значений, в табл. 1 представлены средние значения функций отклика.

Внешний вид плиток наглядно свидетельствует о существенном различии структуры и свойств полученных экспериментальных материалов.

Результаты исследований

Математическую обработку результатов эксперимента проводили с использованием программы ReliaSoft DOE++. В результате обработки для каждой функции отклика с достаточно высоким значением коэффициента корреляции определены параметры уравнений регрессии второго порядка общего вида:

$$y = a + k_1X_1 + k_2X_2 + k_3X_1X_2 + k_4X_1^2 + k_5X_2^2, \quad (1)$$

где a — свободный член; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 — коэффициенты при переменных (табл. 2).

Соответствующие уравнения можно представить в виде аналитических выражений

$$\Delta V = -4{,}1889 + 8{,}2717X_1 + 51{,}9383X_2 +$$
$$+0{,}8575X_1X_2 + 9{,}8183X_1^2 + 35{,}5183X_2^2, \quad (2)$$
$$\rho = 1686{,}7778 - 102{,}05X_1 - 489{,}7X_2 +$$
$$+3{,}975X_1X_2 - 145{,}4167X_1^2 - 288{,}2667X_2^2, \quad (3)$$
$$\Pi = 4{,}2222 + 0{,}2467X_1 - 6{,}35X_2 +$$
$$+0{,}9675X_1X_2 - 2{,}1933X_1^2 + 6{,}5367X_2^2, \quad (4)$$
$$B = 2{,}7444 + 0{,}6783X_1 - 2{,}6133X_2 +$$
$$+1{,}0525X_1X_2 - 1{,}2317X_1^2 + 4{,}3433X_2^2, \quad (5)$$
$$\sigma = 37{,}6144 + 2{,}245X_1 - 11{,}5883X_2 -$$
$$-0{,}715X_1X_2 - 7{,}7517X_1^2 - 12{,}5517X_2^2. \quad (6)$$

В представленных уравнениях X_1 и X_2 выражены в кодированных переменных, предел варьирования которых изменяется от –1 до +1. При решении уравнений для конкретных значений переменных, следует пересчитать натуральные значения параметров в кодированные по выражениям:

$$X_1^{\text{код}} = \frac{X_1^{\text{нат}} - 10}{5}; \; X_2^{\text{код}} = \frac{X_2^{\text{нат}} - 710}{30}.$$

Например, свойства материалов, имеющих в составе 7 % колеманита и обожженных при 720 °С, можно рассчитать по уравнениям (2) – (6), подставляя значения кодированных переменных:

$$X_1^{\text{код}} = \frac{7-10}{5} = -0{,}6; \; X_2^{\text{код}} = \frac{720-710}{30} = 0{,}333.$$

С использованием полученных уравнений регрессии (2) – (6) были построены 3D-поверхности, которые создают наглядное представление об основных тенденциях изменения свойств, и номограммы (рис. 3), что дает возможность быстро и точно определить величину любого из исследованных свойств при заданных значениях параметров.

Обсуждение результатов

Трехкомпонентная система “глина – стеклобой – колеманит” может служить базовой основой энергосберегающей технологии плиточных облицовочных материалов. Выполненные исследования показали, что в данной системе, изменяя температурный режим обжига и варьируя количество колеманита, можно получать материалы с различной структурой и свойствами (рис. 4):

— легкие пористые облицовочные плитки с хорошими теплоизоляционными свойствами (рис. 4*а*, состав 3): объемный коэффициент вспенивания достигает значения 2, размеры пор — 50 – 300 мкм; ρ — 800 – 1000 кг/м^3, B — 2 – 4 %; σ — 10 – 15 МПа. Технологические параметры реализации характеризуются областью варьирования факторов: $X_1 = 5 – 15$; $X_2 = 730 – 740$;

— особый интерес представляет область условно безусадочных составов: $X_1 = 5 – 15$; $X_2 = 710 \pm 5$, где материалы сохраняют в процессе обжига стабильность формы и размеров за счет наложения и обнуления (нейтрализации) эффекта усадочных и вспенивающих деформаций. При этом формируется равномерная микропористая структура (размеры пор не превышают 50 мкм) (рис. 4*б*, состав 5), обладающая удовлетворительными для облицовочных материалов свойствами: ρ — 1400 – 1600 кг/м^3, B — 2 %; σ — 35 МПа;

Таблица 2

Параметры уравнений регрессии и коэффициенты корреляции

Коэффициенты уравнения регрессии (1)	Функции отклика				
	ΔV, %	ρ, кг/м^3	П, %	B, %	σ, МПа
a	–4,1889	1686,7778	4,2222	2,7444	37,6144
k_1 (X_1)	8,2717	–102,05	0,2467	0,6783	2,245
k_2 (X_2)	51,9383	–489,7	–6,35	–2,6133	–11,5883
k_3 (X_1X_2)	0,8575	3,975	0,9675	1,0525	–0,715
k_4 (X_1^2)	9,8183	–145,4167	–2,1933	–1,2317	–7,7517
k_5 (X_2^2)	35,5183	–288,2667	6,5367	4,3433	–12,5517
Коэффициент корреляции, %	93,31	83,49	89,89	79,88	66,70

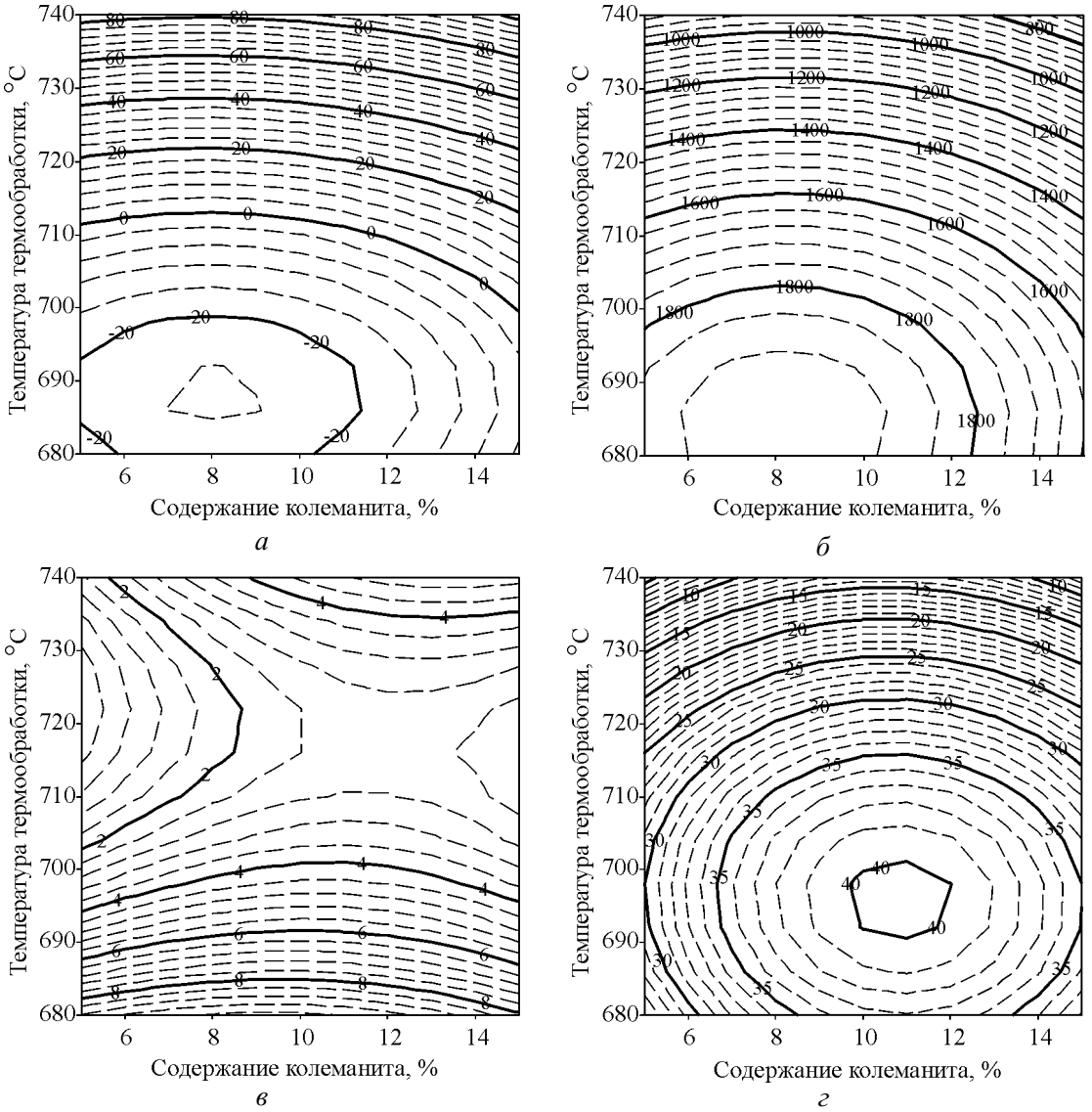


Рис. 3. Графическое решение уравнения регрессии в виде номограмм для функций отклика: *а* — изменение объема, ΔV, %; *б* — кажущаяся плотность, ρ, кг/м^3, *в* — водопоглощение, *В*, %, *г* — предел прочности на сжатие, σ, МПа.

— при варьировании факторов в диапазоне $X_1 = 5 - 12$; $X_2 = 695 - 705$ получают хорошо спеченные материалы с достаточно плотной и прочной структурой (рис. 4*в*, состав 7): ρ — 1800 – 2000 кг/м^3, *В* — 2 – 4 %; σ — 35 – 40 МПа.

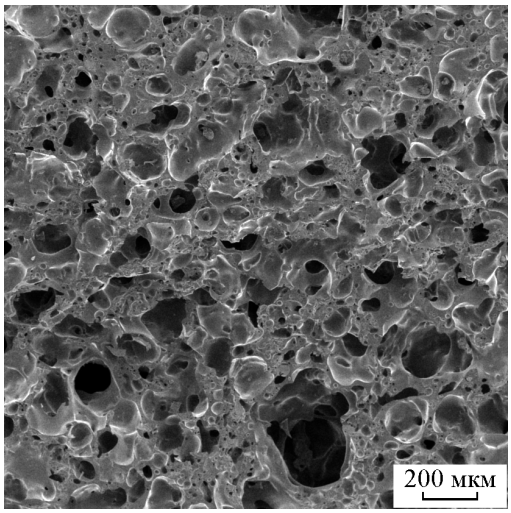
Найденные уравнения регрессии и их графические решения в виде номограмм можно рекомендовать специалистам как справочный материал для быстрого, простого и эффективного решения вопросов проектирования составов масс и подбора рационального режима обжига облицовочных материалов на основе вторичного стекольного боя.

В процессе обжига при температуре выше 700 °С у всех материалов формируется водонепроницаемая поверхностная пленка, обеспечивающая малые значения открытой пористости и водопоглощения (рис. 5).

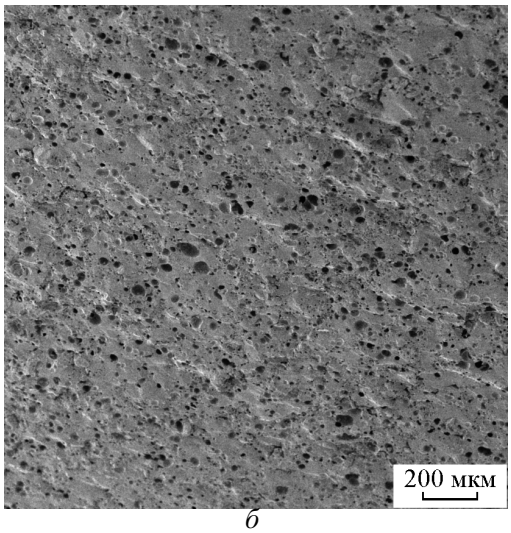
Обязательным условием формирования равномерно пористых структур в системе “глина – стеклобой – колеманит” является высокое (более 70 %) содержание стекольного боя, достаточное для создания непрерывной в объеме фазы. Температурная зависимость вязкости “усредненного” состава стеклобоя может быть описана уравнением Фогеля – Фулчера – Таммана (ФФТ) (рассчитано по химическому составу стекла):

$$\lg\eta = -3{,}12 + \frac{5142{,}3}{t - 209{,}5}; \quad t = 209{,}5 + \frac{5142{,}3}{\lg\eta + 3{,}12},$$

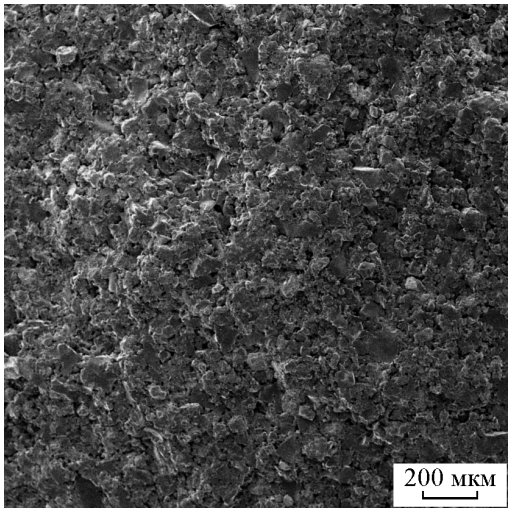
где η — вязкость стекла, Па·с; *t* — температура, °С.



а

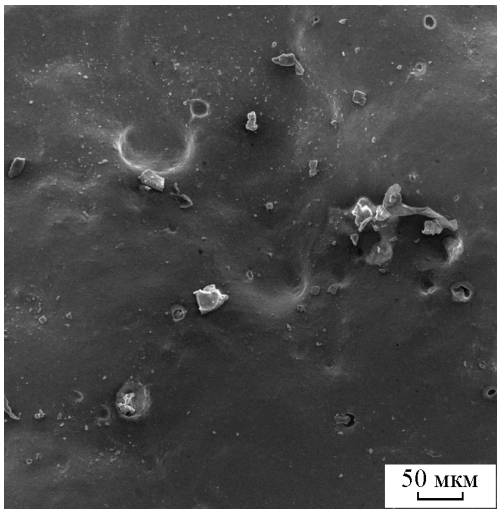


б

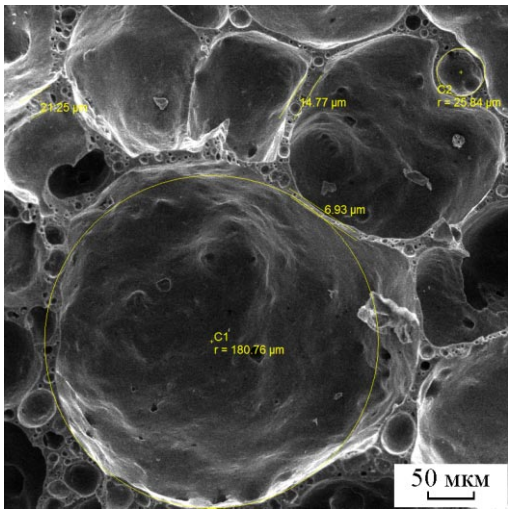


в

Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения структуры материалов разных составов: *а* — 3, *б* — 5, *в* — 7.



а



б

Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения поверхности (*а*) и внутренней структуры (*б*) материала, полученного по режиму 8 (табл. 1).

Процессы спекания, пластической деформации, вспенивания стекол эффективно протекают при уровне вязкости от 10^7 до $10^{5,5}$ Па·с, что согласно расчетам по приведенному уравнению ФФТ соответствует температурам 718 – 800 °С.

Согласно уравнениям регрессии (2) – (6) именно температура обжига материалов оказывает решающее влияние на тип формирующейся структуры материала и значение технических свойств.

Выводы

Выполненные экспериментальные исследования и последующая математическая обработка результатов подтвердили высказанные предположения о

неоднозначном влиянии колеманита на структуру и свойства материалов, полученных путем спекания композиций системы "глина – стеклобой – колеманит" и позволили сформулировать особенности и преимущества его использования в производстве стеклокерамической облицовочной плитки:

— в сырьевой смеси рекомендовано использовать колеманит, предварительно обожженный при 400 °С во избежание растрескивания прессовок при его интенсивной низкотемпературной дегидратации;

— замена стекольного боя до 15 % колеманитом повышает прочность отпрессованных сырцовых плиток, обеспечивает сохранность их формы и размеров, снижает риск разрушения при транспортировке, загрузке в печь и т.п.;

— наличие колеманита способствует интенсификации жидкофазного спекания, что дает возможность снизить температуру обжига на 20 – 30°, следовательно, экономить энергию, топливо;

— введение колеманита открывает возможность управления процессом формирования структуры материала, получая при необходимости как плотно спеченные материалы, так и микропористые безусадочные плитки или пористые теплоизоляционные материалы;

— наиболее значимым фактором управления структурой и свойствами материалов в системе "глина – стеклобой – колеманит" является температура, в связи с чем следует обоснованно выбирать и четко соблюдать температурный режим обжига плиток;

— добавка колеманита дает возможность расширить диапазон используемых глин, в том числе местных, низкосортных.

Учитывая вышесказанное, считаем введение колеманита в количестве 5 – 7 масс. % в сырьевые смеси стеклокерамических облицовочных материалов на основе стекольного боя обоснованным и целесообразным технологическим решением. Система "глина – стекольный бой – колеманит" может служить основой для получения облицовочных материалов с различным комплексом технико-эксплуатационных свойств. Кроме того, эту систему можно рекомендовать для использования в качестве легко спекающейся матрицы композиционных облицовочных материалов. Наполнителями в таких композитах могут быть стеклобой в виде гранулята, отходы камнедробления. Учитывая, что рекомендуемые материалы используют как облицовочные, особое внимание следует уделить способам и методам декорирования поверхности.

Литература

1. Онищук В.И., Жерновая Н.Ф., Дороганов Е.А. Мозаичная смальта для строительства. Строительные материалы, 2007, № 8, с. 13 – 15.
2. Бессмертный В.С., Жерновой Ф.Е., Дорохова Е.С., Изотова И.А. Методология разработки состава и прогнозирования свойств композита на основе стекольного боя. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015, № 3, с. 130 – 134.
3. Мазура Н.В., Левицкий И.А. Баранцева С.Е. Комплексное исследование минерального сырья при получении нефриттованных глазурей. Материалы Всероссийской конференции "Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерагения Северо-Запада России". Петрозаводск, Институт Геологии КарНЦ РАН, 2007, с. 238 – 241.
4. Мазура Н.В., Левицкий И.А. Применение колеманита для улучшения качественных характеристик нефриттованной глазури. Стекло и керамика, 2008, № 1, с. 20 – 23.
5. Кичкайло О.В., Левицкий И.А. Влияние добавок колеманита на спекание, свойства и микроструктуру сподуменовой термостойкой керамики. Стекло и керамика, 2011, № 2, с. 20 – 24.

References

1. Onishchuk V.I., Zhernovaya N.F, Doroganov E.A. Mozaichnaya smalta dlya stroitelstva [Mosaic smalt for construction]. *Stroitel'nye Materialy — Construction Materials* (in Rus), 2007, no. 8, pp. 13 – 15.
2. Bessmertny V.S., Zhernovoy F.E., Dorokhova E.S., Izotova I.A. Metodologiya razrabotki sostava i prognozirovaniya svoystv kompozita na osnove stekolnogo boya [The methodology of composition developing and composite properties prediction the based on glass cullet]. *Vestnik BGTU im. V.G.Shukhova — V.G. Shukhov Bulletin of BSTU*, 2015, no. 3, pp. 130 – 134.
3. Mazura N.V., Levitskii I.A., Barantseva S.E. *Kompleksnoye issledovaniye mineralnogo syrya pri poluchenii nefrittovannykh glazurey* [Complex research of mineral raw materials in the preparation of jaded glazes]. Proc. Conf. Geodynamics, magmatism, mineragens and sedimentogenesis North-West of Russia, Petrozavodsk, Institute of Geology of Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences Publ., 2007, pp. 238 – 241.
4. Mazura N.V., Levitskii I.A. Primeneniye kolemanita dlya uluchsheniya kachestvennykh kharakteristik nefrittovannoy glazuri [Use of colemanite for improving the quality of unfritted]. *Steklo i keramika — Glass and Ceramics*, 2008, vol. 65, no. 1, pp. 19 – 22.
5. Kichkailo O.V., Levitskii I.A. Effect of colemanite additions on sintering, properties, and microstructure of spodumene heatproof ceramic. *Steklo i keramika — Glass and Ceramics*, 2011, vol. 68, no. 1 – 2, pp. 56 – 60.

Статья поступила в редакцию 27.10.2015 г.

Жерновая Наталья Федоровна *— Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46), кандидат технических наук, доцент, специалист в области физической химии и технологии стекла. E-mail: natalia.zhernovaya@gmail.com.*

Дороганов Евгений Анатольевич *— Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46), кандидат технических наук, профессор, специалист в области физикохимии и технологии керамики. E-mail: doroganov@intbel.ru.*

Бессмертный Василий Степанович *— Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46), доктор технических наук, профессор, специалист в области плазменной обработки материалов: стекла, керамики, вяжущих.*

Дорохова Екатерина Сергеевна *— Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46), аспирант.*

Жерновой Федор Евгеньевич *— Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46), кандидат технических наук, доцент, специалист в области компьютерного моделирования. E-mail: fedor.zernovoy@gmail.com.*

Здоренко Наталья Михайловна *— Белгородский университет кооперации, экономики и права, (Россия, 308023, г. Белгород, ул. Садовая, д. 116а, БУКЭП), кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, профессор РАЕ, специалист в области сушки и спекания.*

Изотова Ираида Алексеевна *— Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46), магистрант.*

Glassceramic composite with multifunctional colemanite additive

N. F. Zhernovaya, Ye. A. Doroganov, V. S. Bessmertnyy, Ye. S. Dorokhova, F. Ye. Zhernovoy, N. M. Zdorenko, I. A. Izotova

The effect of colemanite in the technology and the technical properties of the glass-ceramic clad-ding materials obtained by sintering of the mass with a high content of glass cullet was studied. Colemanite showed himself as a multifunctional additive, increasing the strength of the com-pacts, intensifying the process and reducing the sintering temperature to form a porous structure of obtained cladding materials. Mathematical tools and graphic support (set of nomograms) were proposed, making it possible to quickly and easily find the technological parameters of obtaining materials with desired properties.

Keywords*:* colemanite, sintering, foaming, porous structure, mathematical modeling, regression equation, a nomogram, wall tiles.

Zhernovaya Natalia *— Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Shukhov BSTU, Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46), PhD (Eng), associated professor, specialist in physical chemistry and technology of glass. E-mail: natalia.zhernovaya@gmail.com.*

Doroganov Evgeniy *— Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Shukhov BSTU, Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46), PhD (Eng), professor, specialist in physical chemistry and ceramics technologies. E-mail: doroganov@intbel.ru.*

Bessmertny Vasiliy *— Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Shukhov BSTU, Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46), DrSci (Eng), professor, specialist in the field of plasma processing of materials: glass, ceramics, cementitious.*

Dorokhova Ekaterina *— Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Shukhov BSTU, Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46), postgraduate student.*

Zhernovoy Fedor *— Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Shukhov BSTU, Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46), PhD (Eng), associated professor, specialist in the field of computer modeling. E-mail: fedor.zernovoy@gmail.com.*

Zdorenko Natalia *— Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Shukhov BSTU, Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46), PhD (Eng), professor, specialist in the field of drying and sintering.*

Izotova Iraida *— Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Shukhov BSTU, Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46), master student.*