

УДК 666.615; 552.11

И. А. Левицкий, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой (БГТУ);
С. Е. Баранцева, кандидат технических наук, старший научный сотрудник (БГТУ);
А. И. Позняк, кандидат технических наук, младший научный сотрудник (БГТУ)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗАЛЬТОВ И ТУФОВ В КЕРАМИЧЕСКИХ МАССАХ ДЛЯ ПЛИТОК ВНУТРЕННЕЙ ОБЛИЦОВКИ СТЕН

Приведены результаты изучения химико-минералогического состава и технологических свойств базальтов и туфов, разведанных на территории Республики Беларусь, и установлена возможность их использования в качестве компонентов керамических масс для получения плиток внутренней облицовки стен. Определен критерий интенсификации процесса спекания сырьевых композиций, выраженный отношением оксидов $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, и установлены пределы его значений, при которых снижаются показатели открытой пористости образцов плиток до 16,0–21,5%, механическая прочность при изгибе увеличивается до 35,0–36,5 МПа, при этом значения водопоглощения составляют 13,2–9,8%, усадки – 1,2–1,3%, температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) – $(6,87–7,05) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

The results of study of chemical and mineralogical composition and technological properties of basalts and tuffs, explored on the territory of the Republic of Belarus are presented, and the possibility of their use as components of ceramic materials for interior wall facing tiles is established. The criterion of intensification of the sintering process of raw compositions, expressed by ratio of oxides $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, is defined and the limits of its values is set, at which open porosity of the tiles reduce to 16,0–21,5%, mechanical flexural strength up to 35,0–36,5 MPa, water absorption value is 13,2–9,8%, shrinkage – 1,2–1,3%, thermal coefficient of linear expansion (TCLE) – $(6,87–7,05) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Введение. Повышение качества строительных материалов и обеспечение их высоких эксплуатационных характеристик требует решения задач, связанных с разработкой наиболее эффективных способов интенсификации процесса спекания сырьевых композиций при получении керамических плиток для внутренней облицовки стен. Спекание относится к одному из важнейших процессов при синтезе различных силикатных и других тугоплавких материалов, при котором формируется их структура и обеспечиваются требуемые физико-химические свойства. С увеличением степени спекания возрастает плотность, прочность, постоянство объема при высоких температурах, химическая стойкость и сопротивляемость воздействию различных агрессивных сред. Под спеканием понимают процесс получения прочного тела из порошков при воздействии высоких температур за счет самопроизвольного уменьшения свободной энергии материала при его термообработке. К факторам, ускоряющим процесс спекания, относятся механические, теплотехнические и химические, однако наибольшее распространение в практике получил последний, который заключается в подборе и введении добавок в сырьевую смесь, способствующих образованию повышенного количества реакционной жидкой фазы. В большинстве случаев выбор добавок сводится к эмпирическому подбору состава инициатора спекания, однако данный подход не обеспечивает оптимизации принимаемых

технических решений. Кроме того, отсутствуют критерии оценки эффективности действия различных добавок при взаимодействии с компонентами сырьевой композиции, что сдерживает их широкое применение в керамической промышленности. Как показано в работах [1–2], положительное действие добавок определяется не только ускорением образования жидкой фазы в керамических дисперсных системах, но и реологическими свойствами расплава (вязкости, строения и др.).

В литературе имеются сведения [3–4] о возможности практического применения горных пород вулканического происхождения в керамических массах для интенсификации процесса спекания при получении различных изделий строительного назначения с высокими показателями физико-химических свойств. Установлено, что при температурах 1100–1150°C из этих пород формируется материал практически с нулевым водопоглощением и структурой, близкой к стеклокристаллической [5]. Вышеуказанное позволило прогнозировать эффективность использования таких пород в качестве компонентов, интенсифицирующих спекание керамических масс для плиток внутренней облицовки стен. Кроме того, в настоящее время актуальным является вовлечение в производство местных сырьевых ресурсов взамен импортируемых, более полное использование сырья осваиваемых месторождений, а также разработка безотходных технологий.

В Республике Беларусь в пределах Брестской области разведаны месторождения базальтов, которые относятся к вендскому (неопротерозойскому) возрасту и занимают площадь около 28 тыс. км². Формационно эти породы принадлежат к траппам Волыньско-Брестской магматической провинции (ВБМП), которая широко распространена на юго-западной окраине Восточно-Европейской платформы и расположена на территории Польши, Беларуси, Украины и Молдовы. Глубина залегания базальтов в пределах провинции значительно колеблется. В Беларуси вендские базальты залегают на глубине от 40 до 600 м. Траппы ВБМП представлены переслаиванием потоков базальтов и пачек базальтовых туфов и имеют выдержанный минеральный и химический состав по площади. В природе породы залегают совместно при различном массовом соотношении.

В связи с этим целью данной работы является исследование возможности использования базальтов и туфов, разведанных на территории Республики Беларусь, в качестве компонентов керамических масс для плиток внутренней облицовки стен и установление критерия интенсификации процессов спекания сырьевых композиций.

Основная часть. В качестве объекта исследования выбраны валовые пробы базальта и туфа, залегающие в пределах Малоритского района Брестской области, полученные из десяти точечных проб, отобранных с различной глубины залегания в пределах месторождения.

Изменение агрегатного состояния пород при нагревании оценивали визуально по спекам, полученным при многопозиционной термической обработке проб в электрической печи марки LH 15/14 фирмы Nabertherm (Германия) в корундизовых тиглях при температурных экспозициях 900, 1000, 1050, 1100, 1150, 1170, 1200 и 1300°C со скоростью нагрева 600°C/ч и выдержкой 20 мин.

Изготовление образцов керамических плиток осуществлялось методом полусухого прессования. Получение пресс-порошка проводилось путем термического обезвоживания шликера после совместного мокрого помола компонентов массы в шаровой мельнице марки SPEEDY-1 (Италия). Двухступенчатое прессова-

ние плиток осуществлялось при максимальном удельном давлении (20 ± 2) МПа, после чего отформованный полуфабрикат поступал на сушку при температуре (150 ± 5)°C и затем обжигался при максимальной температуре (1110 ± 5)°C на поточно-конвейерной линии РКК 250/63 в производственных условиях ОАО «Березастройматериалы», так как воспроизвести действующий на предприятии режим обжига в лабораторных условиях является затруднительным.

Базальт представляет собой горную породу нормальнощелочного ряда, образовавшуюся в результате извержения магмы, с порфировой или пористой структурой, которая зависит от процесса кристаллизации магмы и времени образования породы. По внешнему виду это темные, темно-серые или черные, плотные или мелкозернистые породы, обладающие высокой плотностью (3000–3300 кг/м³) и прочностью (предел прочности при сжатии составляет 400–450 МПа).

Туфы – это вулканическая алюмосиликатная горная порода, образовавшаяся из твердых продуктов вулканических извержений – вулканического пепла, песка, лапиллей, бомб, обломков горных пород, впоследствии уплотненных и сцементированных. Порода отличается угловатостью обломков и несортированностью, за счет чего их структура характеризуется более высокой пористостью и небольшой плотностью по сравнению с базальтом. Связующими компонентами минеральных составляющих туфов являются вулканический пепел, глинистое и кремнистое сырье, в небольшом количестве присутствуют вторичные (тонкочешуйчатый хлорит) и рудные минералы (магнетит, ильменит). Вулканогенный материал в туфах образовался за счет дробления и разрушения продуктов основной магмы: вулканического стекла, слабо раскристаллизованной лавы и в различной степени раскристаллизованных базальтов.

В табл. 1 и 2, соответственно, приведен химический и минералогический состав проб базальта и туфа Республики Беларусь, используемых при проведении экспериментальных исследований.

Систематические отклонения содержания некоторых оксидов в туфах от их средних значений в базальтах объясняются химической неустойчивостью вулканических продуктов основного состава в экзогенных условиях.

Таблица 1

Химический состав базальта и туфа

Сырьевой материал	Содержание оксидов, мас. %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO
Базальтовый туф	46,8–48,0	14,5–15,3	0,4–1,0	3,3–4,1	8,8–8,2	0,1–0,2	2,0–2,4	12,8–14,4	1,7–2,0
Базальт	48,2–50,7	14,6–15,6	7,7–10,3	2,8–3,4	1,9–2,4	2,0–2,6	1,8–2,4	9,4–9,8	4,8–5,1

Таблица 2

Минералогический состав базальта и туфа

Наименование минералов	Содержание минералов в породах, об. %	
	Базальтовый туф	Базальт
Плагиоклаз	10,0–30,0	40,0–45,0
Клинопироксен (авгит, пижонит)	0–20,0	30,0–35,0
Полевой шпат	0–10,0	2,5–3,0
Рудные минералы (магнетит, ильменит)	5,0–15,0	8,0–10,0
Хлорофенит	–	5,0–10,0
Вулканическое стекло, литокласты базальтовой лавы	20,0–80,0	4,0–6,0
Анальцим	2,0–10,0	1,0–2,5
Хлорит	5,0–20,0	–
Глинистые минералы (монтмориллонит, сапонит, каолинит)	10,0–40,0	–
Кварц	0–10,0	–

Интенсивные процессы девитрификации и разложения вулканического стекла, вторичные изменения фемических минералов и плагиоклазов привели к значительному перераспределению (концентрации и выносу) некоторых оксидов и, прежде всего, легко подвижных щелочных и щелочноземельных металлов, а также кремнезема и оксидов железа в различных степенях окисления [6].

Так, содержание оксида кремния в туфах в среднем на 3–4 мас. % меньше, чем в базальтах, что связано с возможным выносом аморфного кремнезема в постседиментационную стадию. Различия наблюдаются в количестве оксидов железа (III) и железа (II), при этом в туфах, как правило, содержание Fe_2O_3 существенно преобладает над FeO . Уменьшение, иногда полное исчезновение оксида железа (II), обусловлено легкой окисляемостью тонко раздробленного вулканогенного материала. Различия химического состава туфов и базальтов наблюдаются в содержании и соотношении оксидов щелочных и щелочноземельных металлов. Среднее содержание MgO в туфах на 2–4 мас. % выше, чем в базальтах. Обратная картина наблюдается для CaO , количество которого в туфах резко уменьшено.

В распределении оксидов щелочных металлов установлены следующие особенности: их суммарное содержание в туфах примерно в 2 раза выше, чем в базальтах; увеличено количество K_2O и уменьшено содержание Na_2O . Такие аномалии являются результатом вторичного изменения пирокластического материала основного состава и аутигенного минералообразования, которые происходили в процессе седиментации, диагенеза и эпигенеза под влиянием вод бассейна седиментации, остаточных и циркулировавших растворов. Повсеместное повышенное содержание калия обусловлено, по-видимому, сорбцией его катионов из морской воды и остаточных растворов аутигенными

глинистыми минералами. Натрий, высвободившийся при разложении плагиоклазов и вулканического стекла и отсутствии новообразований натрийсодержащих минералов, выщелачивался аналогично кальцию. Основная масса гидроксидов железа остается в составе обломков лавы, вулканических пород и стекла [6].

Минералогический состав пород, приведенный в табл. 2, свидетельствует о том, что базальтовые туфы характеризуются значительным содержанием вулканического стекла и глинистых минералов и практически полным отсутствием плагиоклаза, который подвергается разложению в процессе эпигенеза.

На рис. 1 приведены результаты термического анализа проб базальта и туфа.

Установлено, что нагревание базальта сопровождается одним эндотермическим эффектом с минимумом при 85–90°C, соответствующим удалению физически связанной влаги из породы. Общие потери массы при нагревании базальта составляют 3,0–3,1%.

Нагревание туфов характеризуется наличием 5 эндотермических эффектов на термогравиметрической кривой, которые сопровождаются уменьшением массы образца. Необходимо отметить двухступенчатый характер низкотемпературного эффекта с минимумами при 75 и 120°C, соответствующего присутствию в составе породы минералов монтмориллонитовой группы.

Пакеты в минералах группы монтмориллонита обращены друг к другу одноименно заряженными тетраэдрическими слоями, вода в межслоевом пространстве удерживается за счет слабых ван-дер-ваальсовских сил, которые легко разрываются даже при невысокой температуре. В связи с тем что для минералов группы монтмориллонита характерен широкий ряд изоморфных превращений, количество воды в межслоевом пространстве различно и зависит от типа катиона, участвующего в замещениях, чем и обусловлен второй минимум в низкотемпературной области.

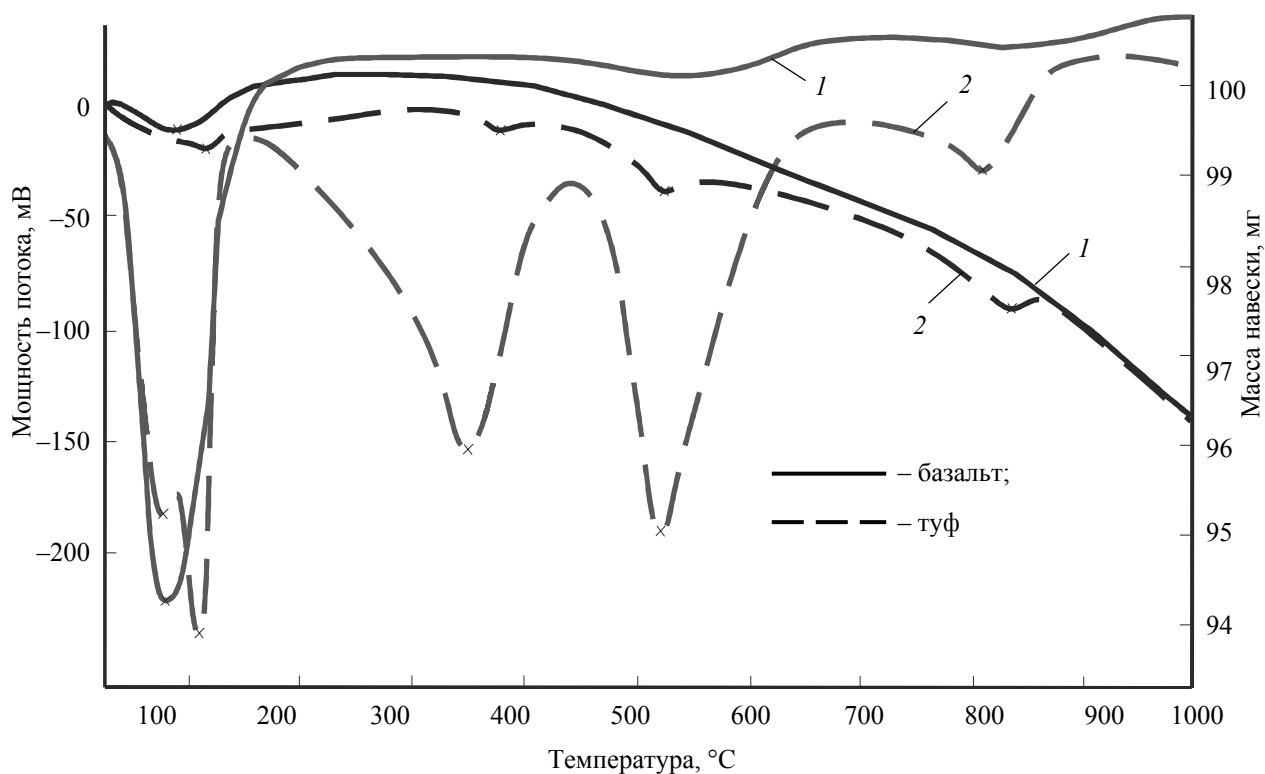


Рис. 1. Кривая дифференциально-сканирующей калориметрии (1) и термогравиметрическая кривая (2) исследуемых пород

Эффект эндореакции при 300–400°C объясняется удалением воды из гидратированных глинистых минералов. Эндотермический эффект в температурном интервале 500–550°C свидетельствует о присутствии в минералогическом составе породы значительного количества хлорита, а в интервале температур 800–850°C соответствует разложению глинистых минералов. Общие потери массы при нагревании туфов значительно выше, чем у базальтов и составляют 6,8–7,1%.

Результаты многопозиционной термической обработки исследованных базальта и туфа позволили определить температуру начала спекания туфа, составляющую 1080–1090°C, а базальта – 1160–1180°C, что связано с повышенным содержанием легкоплавких оксидов железа и оксидов щелочных металлов в туфах. Кроме того, по своей структуре туф является более рыхлым по сравнению с плотным базальтом. Результаты гранулометрического состава пород после их мокрого помола в течение 20 мин свидетельствуют, что туф характеризуется наличием большего количества мелкой фракции (0,1–120,0 мкм), за счет чего увеличивается удельная поверхность частиц и снижается температура спекания.

Сравнительное изучение туфов и базальтов позволило установить возможность их использования в составах керамических масс как компонентов, интенсифицирующих процесс спека-

ния. Вышеуказанное объясняется особенностями химического состава пород, которые заключаются в присутствии легкоплавких оксидов железа и оксидов щелочных металлов, и минералогического состава – в наличии значительного количества вулканического стекла. Температура спекания пород ниже максимальной температуры обжига плиток, что также способствует формированию прочной керамической основы.

В качестве объекта исследования использовалась сырьевая композиция, включающая, мас. %: глину легкоплавкую месторождения «Лукомль» – 13, гранитоидные отсеивы Микашевичского РУПП «Гранит» – 29, доломит месторождения «Руба» – 14, кварцевый песок Гомельского ГОКа – 7, отход производства – бой плитки – 5, а также импортируемую из Украины глину огнеупорную марки ДНПК – 32 (базовая система).

Глина месторождения «Лукомль» является легкоплавкой (огнеупорность 1225–1230°C); по содержанию Al_2O_3 относится к полукислой (содержание Al_2O_3 составляет 13,7–16,2 мас. %); по содержанию Fe_2O_3 и TiO_2 – с высоким содержанием вышеуказанных оксидов. По числу пластичности глина является среднепластичной (число пластичности составляет 17–19), частиц размером менее 0,001 мм содержится 52–55 мас. %. Минералогический состав глины представлен кварцем, полевым шпатом, карбонатами, слюдой и рудными минералами.

Глина марки ДНПК (Донецкая область, Украина) классифицируется как полуокислая (содержание Al_2O_3 составляет 20–38 мас. %), с низким содержанием Fe_2O_3 (1,5–2,7 мас. %). Количество частиц фракции менее 0,001 мм составляет 27,6–62,0 мас. %, среднепластичная (число пластичности – 14–16), огнеупорная (огнеупорность 1450–1750°C). По минералогическому составу глина относится к гидрослюдисто-каолинитовым, в небольших количествах присутствуют включения кварца, полевого шпата, кальцита и рутила.

Гранитоидные отсе́вы представляют собой некондиционную фракцию отсе́вов камнедробления с размером частиц 3–5 мм, образующихся при производстве дорожного щебня на Микашевичском РУПП «Гранит». Главными породообразующими минералами гранитоидных отсе́вов являются плагиоклаз, микроклин, кварц и биотит, вторичные минералы представлены эпидотом, хлоритом и серицитом.

Керамические плитки, полученные на основе вышеприведенной базовой системы однократным обжигом при температуре $(1110 \pm 5)^\circ C$, имеют механическую прочность 19,0–20,3 МПа; водопоглощение составляет 16,2–16,5%. Для повышения механической прочности и обеспечения эксплуатационной надежности изделий исследовалась возможность интенсификации спекания керамических масс.

Базальты и туфы вводились в сырьевые композиции взамен гранитоидных отсе́вов как индивидуально, так и комплексно в различных массовых соотношениях. Анализ физико-химических свойств образцов плиток позволил определить оптимальное количество базальта, при котором обеспечивается более активное спекание керамических масс, составляющее 15 мас. %. Это подтверждается уменьшением открытой пористости плиток до 17,4–20,0% и значением водопоглощения, составляющим 12,5–13,2%, при этом отмечается рост прочности до 30–33 МПа. При увеличении содержания базальта (17,5 мас. % и более) наблюдается резкий рост усадки образцов, вызванный действием сил поверхностного натяжения жидкой фазы, что является негативным фактором при производстве плиток, поскольку требует изменения размеров пресс-форм и приводит к искажению декора готовой продукции.

На основе составов масс, включающих туф, получены керамические плитки, свойства которых при температуре однократного обжига $(1105 \pm 5)^\circ C$ находятся в следующих пределах: водопоглощение составляет 7,5–13,8%, кажущаяся плотность – 1858–2500 кг/м³, открытая пористость – 6,2–11,8%, механическая проч-

ность при изгибе 34,5–42,5 МПа, ТКЛР – $(6,79–7,19) \cdot 10^{-6} K^{-1}$, усадка – 1,1–3,5%, влажностное расширение – 0,041–0,052%. При совместном введении туфа с базальтом интенсификация спекания усиливается, что связано со значительным содержанием вулканического стекла в составе туфа. Установлено, что оптимальным соотношением пород является 1 : 1 при их суммарном содержании 15 мас. %.

Механизм спекания исследуемых керамических масс преимущественно жидкофазный. Жидкая фаза, образовавшаяся за счет взаимодействия тонкодисперсных глинистых компонентов, легкоплавких примесей, присутствующих в гранитоидных отсе́вах, и доломита, растворяет вулканическое стекло, присутствующее в туфах и базальтах, обогащаясь при этом подвижными катионами щелочных металлов и оксидами железа, что способствует ускорению диффузии расплава и его свободному перемещению по поверхности твердых частиц. Реакционноспособная жидкая фаза при обжиге частично растворяет кварцевый песок и гранитоидную породу, обогащаясь при этом более тугоплавкими оксидами кальция, магния, алюминия и кремния, становится более вязкой и лучше сопротивляется деформации.

Определено, что введение базальта и туфа способствует росту количества жидкой фазы при спекании композиций, при этом изменяются ее реологические характеристики. Результаты рентгенофазового анализа позволили судить об увеличении содержания аморфной составляющей, что подтверждается повышением профиля дифрактометрической кривой над уровнем фона при увеличении содержания базальта и туфа в составах сырьевых композиций и зависимостью интенсивности интегрального гало от состава керамической массы, приведенной на рис. 2.

Увеличение содержания аморфной составляющей при обжиге композиций подтверждается результатами инфракрасной спектроскопии.

Широкая полоса поглощения на спектрах в области частот 950–1200 см⁻¹ с минимумом при 1080 см⁻¹ свидетельствует о наличии силикатов различной структуры (каркасные, цепочечные, слоистые). Необходимо отметить, что максимум данной полосы имеет размытый характер, что свидетельствует об увеличении содержания стекловидной составляющей, причем ее количество повышается с ростом содержания базальта в составе сырьевых композиций. Изменение состава жидкой фазы при последовательном введении базальта, а затем туфа фиксировалось методом электроннозондового анализа, результаты которого приведены в табл. 3.

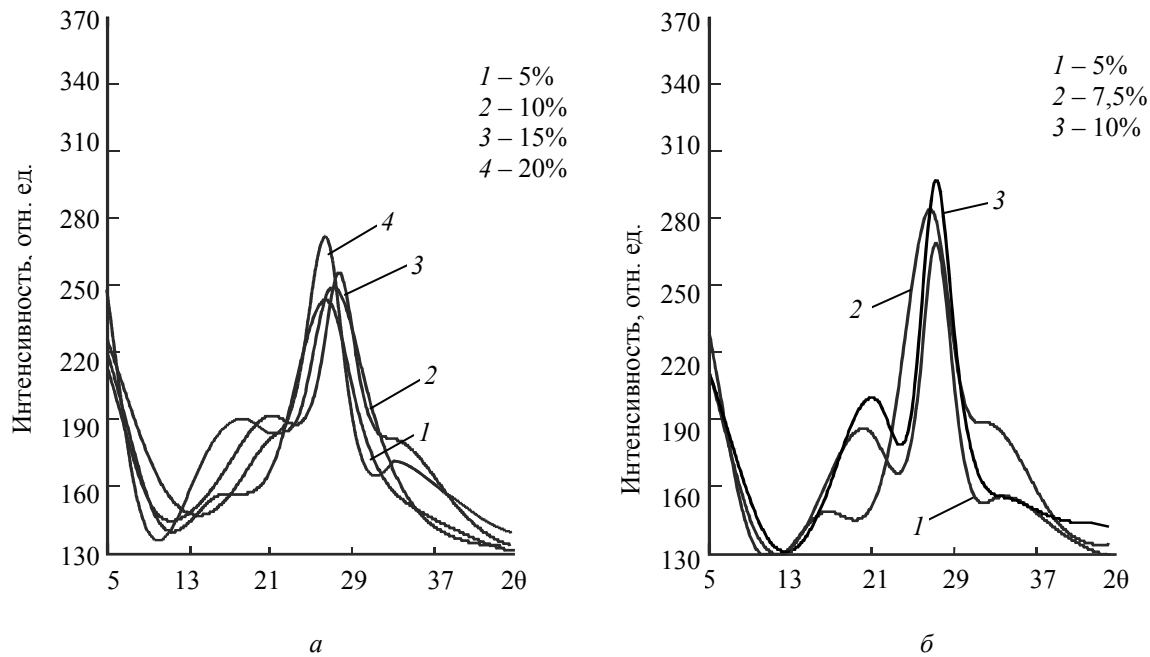


Рис. 2. Зависимость интенсивности интегрального поля гало образцов плиток от содержания базальта (а) и туфа (б) в сырьевых композициях

Выявлено, что при введении базальта и особенно туфа расплав, образующийся при обжиге сырьевых композиций, обогащается оксидами железа и оксидами щелочных металлов, при этом отмечается уменьшение количества оксидов кремния и алюминия. Это согласуется с описанным выше жидкофазным механизмом спекания керамических масс.

На основании полученных данных для исследуемых керамических масс установлен критерий интенсификации спекания сырьевых композиций, выраженный отношением оксидов $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, который при значениях 8,6–9,1 и постоянном суммарном содержании $(\text{CaO} + \text{MgO})$, составляющем 7,5–8,4 мас. %, обеспечивает образование расплава с реологическими характеристиками, повышающими степень спекания и обуславливающими показатели открытой пористости керамического черепка 16,5–20,0% (рис. 3).

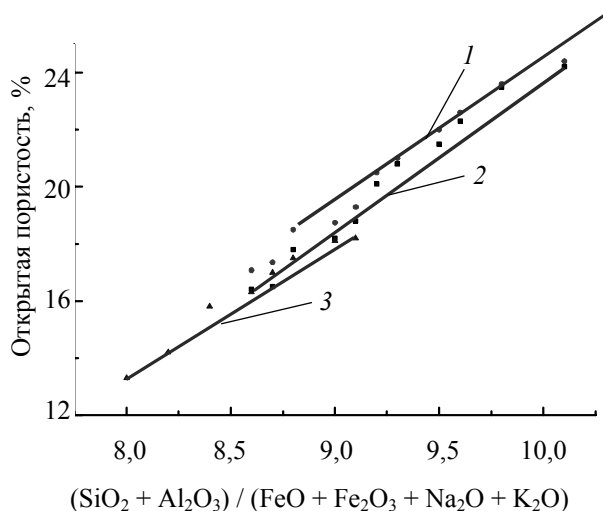
Выявлено, что рост значений вышеприведенного отношения приводит к повышению открытой пористости образцов плиток, что связано с особенностями образования жидкой фазы, которая оказывает определяющее влияние на спекание сырьевых композиций и величину открытой пористости материала. Помимо увеличения количества жидкой фазы и снижения температуры ее образования определенное влияние на реологические характеристики расплава оказывает его состав.

Известно, что увеличение концентрации оксида кремния неизменно ведет к росту вязкости, что указывает на определяющую роль группировок Si – O во взаимном перемещении слоев расплава. Катион железа в базальтовых и туфовых расплавах присутствует в двух степенях окисления – в виде двух- и трехвалентных ионов, выполняющих роль стеклообразователя и модификатора. Оксид железа FeO понижает вязкость расплава, а Fe₂O₃, наоборот, повышает.

Таблица 3

Усредненный состав жидкой фазы, образующейся при обжиге сырьевых композиций с различным содержанием базальта и туфа

Содержание сырьевых компонентов, %		Содержание оксидов в образующемся расплаве, %							
Базальт	Туф	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ +FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
–	–	52,5	1,2	22,5	5,0	10,6	6,7	0,8	0,7
10	–	51,6	1,6	21,4	6,9	9,8	6,2	1,3	1,2
15	–	50,5	1,3	21,9	6,5	10,6	6,3	1,7	1,2
10	5	49,4	1,6	19,5	9,6	10,4	5,7	2,5	1,3
7,5	7,5	47,5	1,9	18,9	11,8	10,3	5,2	2,9	1,5



Керамические массы:

- 1 – базовая система; 2 – с содержанием базальта;
3 – с содержанием базальта и туфа

Рис. 3. Зависимость открытой пористости образцов от $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$

Следовательно, при введении базальта и туфа вязкость расплава снижается, его подвижность и смачивающая способность увеличивается, что интенсифицирует спекание сырьевых композиций за счет активной диффузии легкоподвижных катионов щелочных металлов Na^+ и K^+ .

Заключение. Проведенные сравнительные исследования базальтов и туфов, разведанных на территории Республики Беларусь, позволили выявить различия химического и минералогического состава туфов и базальтов, которые обусловили пониженную температуру спекания туфа (1080–1090°C) по сравнению с базальтом (1160–1170°C). Установлено, что интенсификация процесса спекания и повышение механической прочности керамических плиток при введении базальта и его комбинации с туфом достигается за счет увеличения количества и изменения состава жидкой фазы, образующейся при обжиге. Значительное содержание легкоплавких оксидов железа (12,8–14,8%) и оксидов щелочных металлов (8,1–9,0%) обуславливает формирование маловязкого расплава при более низких температурах, который активно заполняет поровое пространство, что при рациональ-

ном сочетании кристаллических фаз повышает механическую прочность при изгибе керамического черепка на 35,0–36,5% по сравнению с образцами производственного состава.

Выявлено, что образующаяся при термообработке жидкая фаза обогащается оксидами щелочных металлов и оксидами железа, а содержание тугоплавких оксидов кремния и алюминия снижается. Установлено, что наиболее существенное влияние на спекание керамических масс, содержащих базальт и туф, оказывает отношение $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ при суммарном массовом содержании CaO и MgO , составляющем 7,5–8,4 мас. %. Низкие показатели открытой пористости (16,5–20,0%), обуславливающие высокую прочность керамических плиток, отмечаются при значениях вышеприведенного отношения 8,6–9,1.

Литература

1. Glass-ceramic frits for porcelain stoneware bodies: Effect on sintering, phase composition and technological properties / C. Zanelli [et al.] // *Ceramics International*. 2008. Vol. 34, No. 3. P. 455–465.
2. Suvaci E., Tamsu N. The role of viscosity on microstructure development and stain resistance in porcelain stoneware tiles // *Journal of the European Ceramic Society*. 2010. Vol. 30, No. 15. P. 3071–3077.
3. Influence of zeolites on the sintering and technological properties of porcelain stoneware tiles / R. de'Gennaro [et al.] // *Journal of the European Ceramic Society*. 2003. Vol. 23, No. 13. P. 2237–2245.
4. Naga S. M., Bondioni F. Utilization of granodiorite in the production of porcelain stoneware tiles // *Ceramics International*. 2012. Vol. 38, No. 8. P. 6267–6272.
5. Karamanov A., Arrizza L., Ergul S. Sintered material from alkaline basaltic tuffs // *Journal of the European Ceramic Society*. 2011. Vol. 31, No. 12. P. 595–601.
6. Махнач А. С. Веретенников Н. В. Вулканогенная формация верхнего протерозоя (венда) Белоруссии. Минск, 1970. 236 с.

Поступила 11.03.2014