

ПОЛУЧЕНИЕ ОБЛИЦОВОЧНОЙ КЕРАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕСОРТИРОВАННОГО БОЯ ТАРНЫХ СТЕКОЛ

В.Н. Шахова, И.А. Виткалова, А.С. Торлова, Е.С. Пикалов, О.Г. Селиванов

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

Приведены результаты исследований по получению керамического материала, который может быть использован для облицовки фасадов и цоколей зданий и сооружений. Данный материал получен на основе малопластичной глины с добавлением 30 % по массе несортированного боя тарных стекол в качестве флюсующе-упрочняющей добавки, образующей при обжиге стекловидную фазу, и 2,5 % по массе плавня, повышающего количество стекловидной фазы и снижающего температуру жидкофазного спекания материала. В свою очередь стекловидная фаза выступает в роли связующего в объеме материала за счет остекловывания поверхности частиц керамики и их соединения в прочный каркас и создает эффект самоглазурования изделий. Проведены исследования, показывающие, что наибольшая прочность на сжатие и наименьшее водопоглощение разрабатываемого материала получены при использовании в качестве плавня борной кислоты и проведении обжига при максимальной температуре обжига, равной 1050 °С.

Ключевые слова: облицовочная керамика, несортированный стеклобой, тарное стекло, малопластичная глина, флюсующе-упрочняющая добавка, плавень, борная кислота, жидкофазное спекание

Receiving of Ceramic Veneer with the Use of Unsorted Container Glass Breakage

V.N. Shakhova, I.A. Vitkalova, A.S. Torlova, E.S. Pikalov, O.G. Selivanov

Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs, 600000 Vladimir, Russia

The results of studies on the production of ceramic material, which can be used for face veneer and pedestals are presented. This material was obtained on the basis of stiff clay with the addition of 30 % by weight of unsorted container glass breakage as a flux-hardening additive, which forms a vitreous phase during baking, and 2.5 % by weight of a fluxing agent that increases the amount of the vitreous phase and lowers the temperature of the liquid-phase sintering material. In turn, the vitreous phase acts as a binder in the bulk of the material due to the vitrification of the surface of the ceramic particles and their connection into a strong frame and creates the effect of self-glazing products. Studies have been conducted showing that the highest compressive strength and the lowest water absorption of the material being developed were obtained using boric acid as a fluxing agent and baking at a maximum burning temperature of 1050 °C.

Keywords: ceramics veneer, unsorted container glass breakage, container glass, stiff clay, flu[-hardening additive, fluxing agent, boric acid, liquid-phase sintering

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-02-36-41

Развитие промышленного производства и всего человеческого общества в целом неизбежно связано с увеличением темпов образования и накопления отходов производства и потребления. И если в случае с отходами производства по большей части легко осуществима рекуперация, то отходы потребления, как правило, мало востребованы, а их накопление приводит к деградации территорий, на которых размещаются

отходы, и загрязнению окружающей среды отходами и их компонентами.

В связи с этим необходима разработка технологий, позволяющих в больших количествах перерабатывать отходы потребления в изделия высокого качества. При этом необходимо учитывать ситуацию в каждом конкретном регионе как по количеству и составу образующихся отходов потребления, так и по востребованности изделий, которые

могут быть получены с их использованием.

Исследования были выполнены в условиях Владимирской области и направлены на разработку состава шихты для получения облицовочной керамики с использованием несортированного боя тарных стекол [1]. Во Владимирской области в результате деятельности местных предприятий производится большое количество изделий из стекла. При этом стекольный бой как

производственный отход практически полностью повторно перерабатывается местными предприятиями, на которых образуется, как добавка к стекольным шихтам, так как по своему составу аналогичен вырабатываемому этими предприятиями стеклу. В то же время стекольный бой как отход потребления стекольными предприятиями маловостребован в связи с тем, что качество и свойства стекла в большой степени зависят от его состава, разнообразия оксидного состава стекольного боя, который отличается даже для стекла одного назначения, но изготовленного на разных предприятиях, а также наличием различных примесей, попадающих в него при сборе и сортировке. Таким образом, в результате низкой востребованности стекольными предприятиями, негорючести и устойчивости к действию внешних факторов стекольный бой как отход потребления накапливается в местах складирования и захоронения в количествах до 10 % общего объема отходов [2–4]. При этом стекольный бой представляет собой использованные изделия или их фрагменты, которые могут храниться в смешанном виде или сортироваться по видам стекол: оконное, тарное, ампульное, оптическое и т.д. Среди видов стекол в наибольшем количестве накапливается бой тарных стекол, что можно объяснить наиболее высокими объемами производства и потребления стеклотары, а также небольшими по сравнению с другими изделиями из стекла сроками эксплуатации. Также следует отметить, что на свалках и полигонах бой тарных стекол зачастую не сортируют по цветам, что затрудняет их утилизацию и создает необходимость в разработке способов применения несортированного боя тарных стекол.

В настоящее время стекольный бой наиболее широко утилизируется в производстве строительных материалов, в первую очередь керамических. Это объясняется достаточно простой технологией переработки больших объемов отходов. Во Владимирской области существует ряд предприятий сравнительно небольшой мощности, выпускаю-

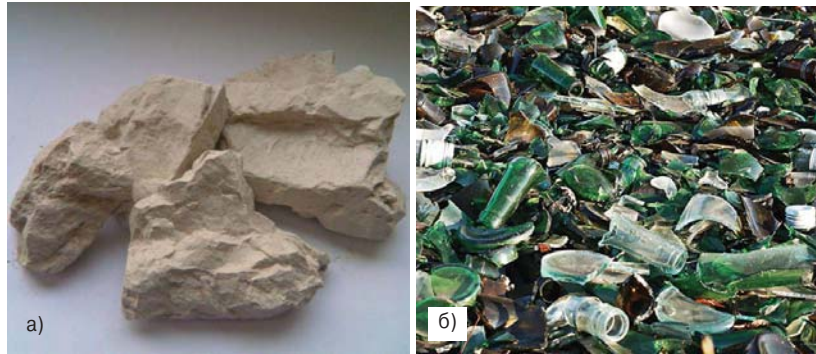


Рис. 1. Малопластичная глина (а) и несортированный бой тарных стекол (б)

Fig. 1. Low plasticity clay (a) and unsorted container glasses breakage (b)

щих изделия из строительной керамики на основе местного сырья в условиях дефицита близкорасположенных месторождений качественных глин [5, 6]. В связи с этим актуальным будет разработка составов шихт на основе местных глин низкого качества с добавлением функциональных добавок, в т.ч. вторичных ресурсов.

Материалы и методы исследования

В качестве основного компонента шихты для получения керамики применялась глина Суворотского месторождения Владимирской области (рис. 1, а), которая имела следующий состав, % по массе: 67,5 SiO₂; 10,75 Al₂O₃; 5,85 Fe₂O₃; 2,8 CaO; 1,7 MgO; 2,4 K₂O; 0,7 Na₂O. Число пластичности данной глины, определенное по стандартной методике, составляло 5,2, а, следовательно, в соответствии с ГОСТ 9169-75 глина относится к малопластичным [5]. Без использования функциональных добавок в составе шихты на основе данной глины не могут быть получены изделия с высокой прочностью и низким водопоглощением. Кроме того, у изделий на основе малопластичной глины низкая трещиностойкость, а, следовательно, для использования данной глины необходима разработка других составов шихт.

Несортированный бой тарных стекол (рис. 1, б), соответствующих ГОСТ Р 52022-2003 вводился в состав шихты в качестве флюсующе-упрочняющей добавки. Несортированный бой тарных стекол представляет собой измельченные отходы по-

требления стеклянной тары для пищевой и парфюмерно-косметической продукции, извлеченные из общей массы отходов потребления на территории Владимирской области, содержащие, % по массе: 66,0–73,5 SiO₂; 2,5–3,5 Al₂O₃; 0,1–2 Fe₂O₃; 6–6,4 CaO; 3,5–4,0 MgO; 13,2–14,9 Na₂O; 0,5–1,4 K₂O; 0,05–0,3 Cr₂O₃.

В качестве плавней рассматривались борная кислота марки В 2-го сорта (ГОСТ 18704-78) с массовой долей основного вещества 98,6 %, полевой шпат марки ПШС 0,30-20 (ГОСТ 13451-77) и доломит марки ДК-18-0,25 (ГОСТ 23672-79). Выбор борной кислоты объясняется тем, что она относится к сильным плавням и позволяет существенно изменить свойства разрабатываемых материалов, что установлено при ранее проведенных авторами данной работы экспериментах, а также добиваться самоглазурования и остекловывания при использовании совместно с добавками, являющимися источниками стекловидной фазы [2, 5–8]. Выбор полевого шпата обусловлен тем, что он при температурах свыше 900 °С образует расплав, в котором растворяются кварц и другие минералы [9, 10], а выбор доломита тем, что при температурах 700–900 °С он разлагается с образованием оксидов кальция и магния, которые при температурах свыше 1000 °С образуют с компонентами глины легкоплавкие соединения [11].

У применяемого полевого шпата следующий состав, % по массе: 62 SiO₂; 24,4 Al₂O₃; 8,1 K₂O; 5,2 Na₂O; 0,3 Fe₂O₃. В свою очередь применяемый доломит имел состав, % по массе:

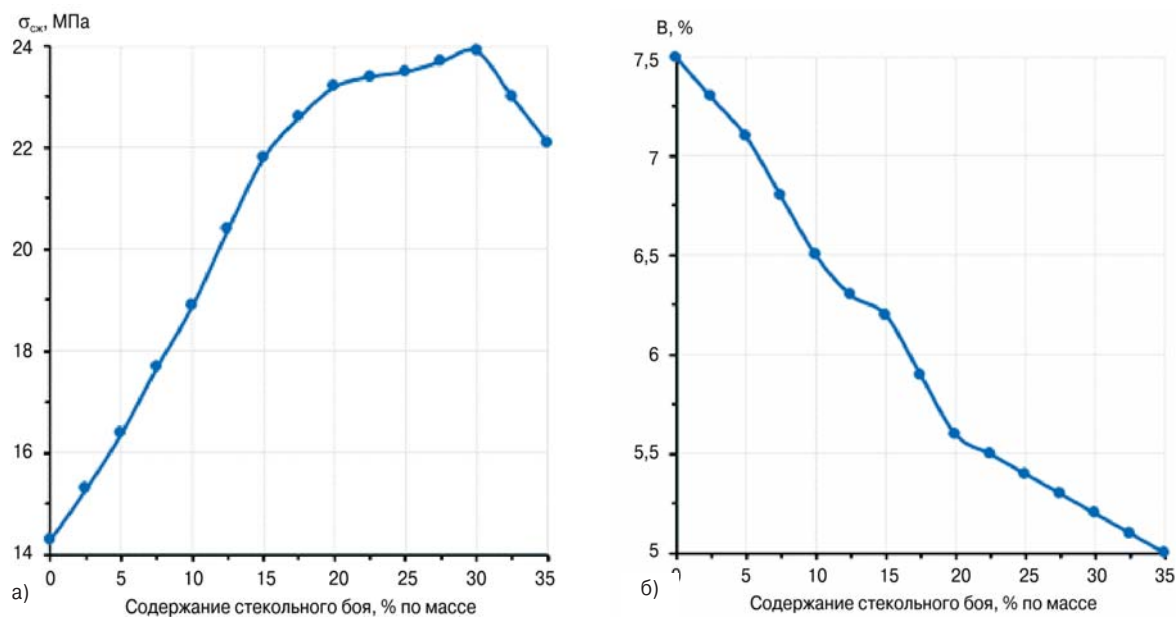


Рис. 2. Зависимость прочности на сжатие (а) и водопоглощения (б) разрабатываемой керамики от содержания несортированного боя тарных стекол

Fig. 2. The dependence of the compressive strength (a) and water absorption (b) of the developed ceramics on the content of unsorted combat container glass

32,5 CaO; 18,8 MgO; 2,4 SiO₂; 1,2 Al₂O₃; 0,2 Fe₂O₃; 55,1 CO₂.

Образцы разрабатываемого материала получали по технологии полусухого прессования [5]. Стекольный бой предварительно промывался и отделялся от этикеток. После этого глину, стекольный бой и доломит высушивали до постоянной массы и измельчали с последующим отбором фракции с размером частиц не более 0,63 мм. После этого компоненты шихты перемешивали в сухом состоянии в требуемых для экспериментов соотношениях. Затем в полученную смесь добавляли воду для получения формовочной массы с влажностью 8 % по массе, из которой при удельном давлении, равном 15 МПа, и максимальной температуре обжига 850–1150 °С получали образцы для определения свойств разрабатываемого материала. Образцы из исследуемых составов изготавливали сериями по три образца в каждой, и при обработке экспериментальных данных для построения зависимостей использовали средние арифметические значения по трем параллельным опытам.

Для выбора соотношения компонентов в шихте и оценки результатов исследования у получаемых образцов по стандартным для керамических материалов методикам определялись

плотность (ρ, кг/м³), прочность на сжатие (σ_{сж}, МПа) и изгиб (σ_{изг}, МПа), открытая (П_{отк}, %) и общая (П_{общ}, %) пористости, водопоглощение (В, %) и морозостойкость (М, циклы).

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе экспериментальных исследований было изучено влияние несортированного боя тарных стекол на основные для любого строительного материала свойства, значения которых определяют прочие характеристики — прочность на сжатие и водопоглощение.

Результаты экспериментов (рис. 2) показывают, что при увеличении содержания стекольного боя до 20 % по массе происходит значительный рост прочности на сжатие, а при 20–30 % по массе прочность на сжатие достигает максимального значения и начинает снижаться при дальнейшем увеличении количества стекольного боя в составе шихты. Подобную зависимость можно объяснить тем, что в результате обжига стекольный бой образует в объеме материала стекловидную фазу, образуя прочный каркас из частиц керамики, соединенных между собой через слои стекловидной фазы. С повышением количества стекольного

боя в составе шихты толщина слоев стекловидной фазы между частицами керамики также увеличивается, вследствие чего прочность на сжатие материала начинает все в большей степени зависеть от свойств стекловидной фазы, которая характеризуется хрупкостью и меньшей прочностью [7], связанной с наличием в ней дефектов, величина и количество которых растут с увеличением толщины слоев стекловидной фазы, и ее хрупкостью.

Водопоглощение материала понижается с увеличением количества стекольного боя в составе шихты в связи с тем, что образующаяся стекловидная фаза заполняет поры и пустоты в объеме материала, переводя большинство остающихся открытых пор в закрытые.

На втором этапе исследования в состав шихты, содержащей 30 % по массе стекольного боя, вводились различные плавни в количестве до 5 % по массе. Полученные данные представлены на рис. 3, а, б. Поскольку графики зависимостей, представленные на рис. 3, б, близко расположены, следует отметить, что границы диапазона рассеяния значений для их построения находятся за пределами друг друга.

Из представленных данных следует, что одновременное

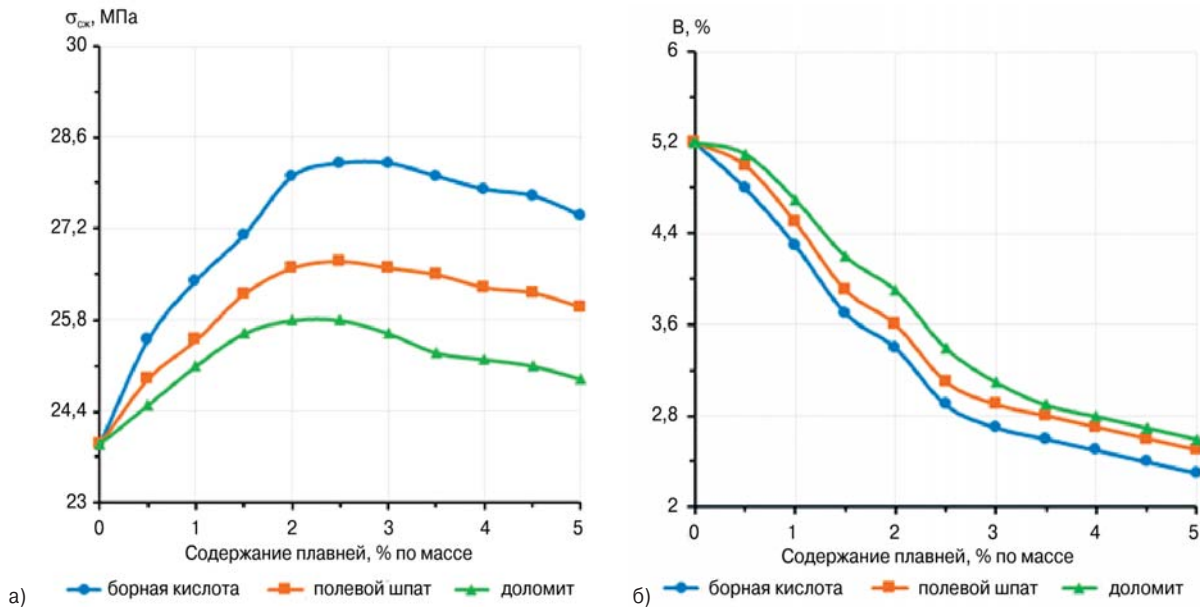


Рис. 3. Зависимость прочности на сжатие (а) и водопоглощения (б) разрабатываемой керамики от содержания плавней

Fig. 3. Dependence of compressive strength (a) and water absorption (b) of the developed ceramics on the smoother content

введение плавней и стекольного боя повышает прочность на сжатие и снижает водопоглощение в связи с тем, что плавни образуют при более низких, чем другие компоненты шихты, температурах расплава, который способствует плавлению других компонентов, способствуя образованию большего количества стекловидной фазы и жидкофазному спеканию материала. Кроме того, при совместном введении стекольного боя и плавней наблюдается эффект остекловывания поверхности частиц керамики и самоглазурования поверхности образцов (рис. 4). Однако стоит учитывать, что при высоком содержании плавней образуются излишки стекловидной фазы, которые по указанным выше причинам снижают прочность материала, а также приводят к потере формы изделиями и к оплавлению их граней.

Также из данных рис. 3 следует, что наибольшая прочность и наименьшее водопоглощение достигаются при использовании борной кислоты в качестве плавня. При этом водопоглощение равномерно снижается с увеличением количества плавней в составе шихты, а прочность на сжатие достигает своего максимума при использовании 2,5 % по массе борной кислоты или полевого шпата, либо

2 % по массе доломита, а при дальнейшем увеличении содержания рассматриваемых добавок начинает снижаться. Подобный характер полученных зависимостей можно объяснить тем, что борная кислота плавится и начинает выполнять роль плавня при низких температурах (170,9 °С), а полевой шпат расплавляется, чем борная кислота, и при более высоких температурах (начиная с 900 °С [9]). Большая часть доломита улетучивается в виде углекислого газа в результате разложения, а оставшиеся оксиды кальция и магния образуют легкоплавкие соединения при температурах свыше 1000 °С и количество образующегося при этом расплава ниже, чем при использовании двух других плавней. Кроме того, стоит учитывать, что при разложении доломита образуются поры и пустоты, которые в определенной мере снижают прочность и повышают водопоглощение.

В связи с полученными данными для дальнейших экспериментов в качестве плавня в состав шихты вводилась борная кислота в количестве 2,5 % по массе. Содержание борной кислоты выбрано исходя из максимального значения прочности на сжатии на рис. 3 и в связи с тем, что при более высоких со-

держаниях рассматриваемой добавки снижается экологическая безопасность керамики, что связано с тем, что борная кислота относится к 3-му классу опасности [2, 5].

На третьем этапе исследования образцы на основе исследуемой глины без введения добавок, содержащие 30 % по массе стекольного боя и 30 % по массе стекольного боя совместно с 2,5 % по массе борной кислоты обжигали при температурах от 850 до 1150 °С. Из результатов определения свойств образцов (рис. 5) следует, что разработанный состав, включающий стекольный бой в качестве флюсующе-упрочняю-



Рис. 4. Эффект самоглазурования поверхности образца

Fig. 4. The effect of the specimen self-glazing

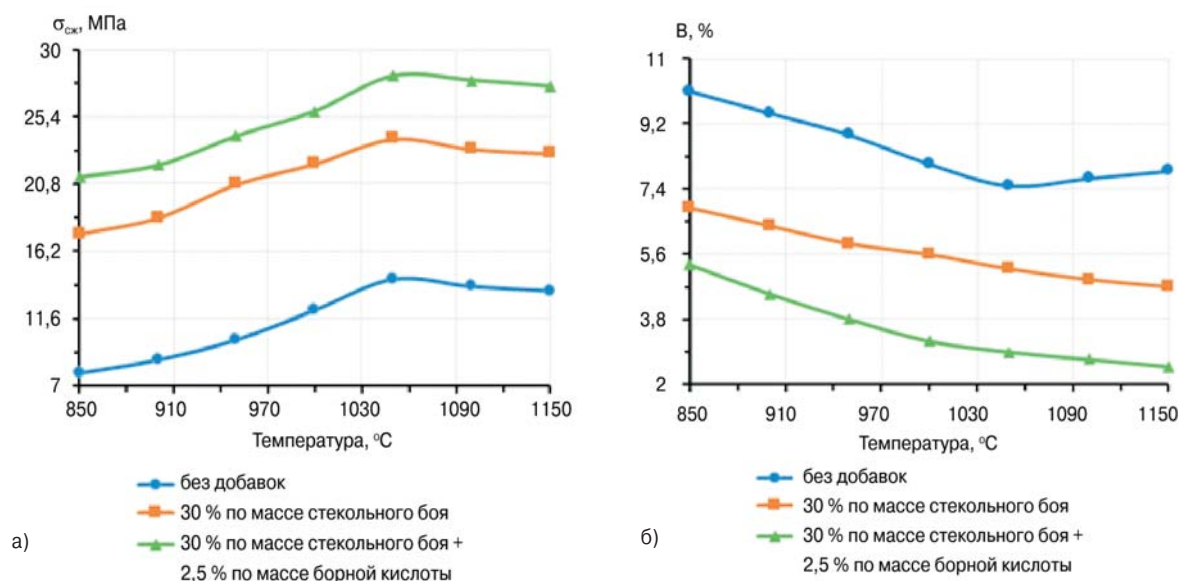


Рис. 5. Зависимость прочности на сжатие (а) и водопоглощения (б) разрабатываемой керамики от температуры обжига

Fig. 5. Dependence of compressive strength (a) and water absorption (b) of the developed ceramics on the firing temperature

шей добавки и борную кислоту в качестве плавня, обладает более высокой прочностью на сжатие и более низким водопоглощением. Для всех составов характерен максимум прочности на сжатие при 1050 °С с дальнейшим снижением рассматриваемого свойства. Это связано с тем, что в составах, содержащих функциональные добавки, при более высоких температурах наблюдается избыток стекловидной фазы, что, как упоминалось ранее, приводит к снижению прочности. Для состава без добавок снижение прочности и повышение водопоглощения связано с возникновением внутреннего кристаллизационного давления [8], приводящего к образованию трещин.

Для оценки результатов исследований был проведен дополнительный эксперимент по определению основных экс-

плуатационных свойств керамики, полученной при максимальной температуре обжига, равной 1050 °С, и на основе малопластичной глины с добавлением 2,5 % по массе борной кислоты и с различным содержанием стекольного боя. Результаты эксперимента представлены в таблице.

Полученные данные подтверждают, что максимальная прочность на сжатие и минимальное водопоглощение могут быть получены при использовании 30 % по массе стекольного боя. Из данных таблицы видно, что значения морозостойкости разрабатываемого керамического материала превышают значение в 40 циклов, которое является минимальным для использования при облицовке фасадов, а при содержании стекольного боя от 20 % по массе и выше значения рассматриваемого показателя

превышают значение 50 циклов, которое является минимальным для использования при облицовке цоколей. Значения плотности и пористости разрабатываемого материала относятся к средним для строительных материалов значениям. Повышение плотности и морозостойкости при снижении общей пористости и повышении закрытой пористости с ростом количества стекольного боя можно объяснить тем, что стекловидная фаза заполняет поры и пустоты в материале и способствует его уплотнению при спекании.

Выводы

В результате проведения исследований был разработан керамический материал на основе малопластичной глины с добавлением 30 % по массе несортированного боя тарных стекол в качестве флюсующе-упрочняющей добавки и 2,5 % по массе борной кислоты в качестве плавня. Совместное использование указанных добавок способствует образованию стекловидной фазы при обжиге, которая образует в объеме материала прочный каркас из частиц керамики, связанных между собой через слои стекловидной фазы. При этом происходит остекловывание частиц керамики в объеме материала и самоглазурование на поверхности

Характеристика разрабатываемой керамики Characteristics of the developed ceramics

Показатель	Содержание стекольного боя, % по массе						
	5	10	15	20	25	30	35
Плотность, кг/м³	1880,5	1896,9	1913,4	1929,9	1946,3	1962,8	1979,3
Прочность на сжатие, МПа	19,4	22,3	25,7	27,4	27,7	28,2	26,1
Прочность на изгиб, МПа	4,4	4,9	5,5	5,8	5,8	5,9	5,6
Водопоглощение, %	3,7	3,4	3,2	2,9	2,8	2,7	2,6
Открытая пористость, %	7,2	6,3	5,5	4,6	3,8	2,9	2,1
Общая пористость, %	13,4	12,8	12,3	11,7	11,1	10,5	9,9
Морозостойкость, циклы	45	47	49	51	53	56	58

изделий, что повышает прочность керамики и снижает водопоглощение. Это, в свою очередь, повышает морозостойкость. Полученные значения морозостойкости позволяют использовать материал при облицовке фасадов и цоколей стен зданий и сооружений. Кроме того, эффект самоглазурования способствует самоочищению

изделий под действием дождя или снега.

Разработанный состав шихты позволяет получать качественные изделия при использовании маловостребованной глины низкой пластичности и несортированного боя тарных стекол, утилизация которого редко проводится без дополнительной сортировки по цветам.

Следовательно, использование результатов данной работы будет способствовать рациональному использованию сырьевых ресурсов и снизит темпы накопления стекольных отходов потребления. Все это позволит расширить ассортимент выпускаемых в настоящее время изделий строительного назначения.

Литература

1. Шахова В.Н., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Керамическая масса для изготовления стеновой и облицовочной керамики: Заявка на изобр. № 2018133990 от 26.09.2018.
2. Маркова А.А., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г., Чухланов В.Ю., Подолец А.А. Комплексная утилизация отходов Владимирской области в производстве высокопрочной строительной керамики из местной малопластичной глины. Экология промышленного производства. 2016. Т. 20. № 3 (95). С. 14–17.
3. Вайсман Я.И., Кетов А.А. Воздействие на окружающую среду и перспективы переработки стеклобоя. Вестник ПНИПУ. Урбанистика. 2011. № 4. С. 78–95.
4. О состоянии окружающей среды и здоровья населения Владимирской области в 2016 году: ежегодный доклад. Вып. 24. Администрация Владим. обл., Департамент природопользования и охраны окруж. среды. Владимир: Транзит-ИКС, 2017. 118 с.
5. Пикалов Е.С., Селиванов О.Г., Чухланов В.Ю., Сухарникова М.А. Применение региональных техногенных отходов в производстве стеновых керамических изделий. Экология и промышленность России. 2017. № 6. С. 24–29.
6. Сухарникова М.А., Пикалов Е.С. Исследование возможности производства керамического кирпича на основе малопластичной глины с добавлением гальванического шлама. Успехи современного естествознания. 2015. № 10. С. 44–47.
7. Воробьева А.А., Шахова В.Н., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г., Сысоев Э.П., Чухланов В.Ю. Получение облицовочной керамики с эффектом остекловывания на основе малопластичной глины и техногенного отхода Владимирской области. Стекло и керамика. 2018. № 2. С. 13–17.
8. Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Использование отходов, содержащих тяжелые металлы, для получения кислотоупорной керамики с эффектом самоглазурования. Экология промышленного производства. 2018. № 2. С. 2–6.
9. Андрианов Н.Т., Балкевич В.Л., Беляков А.В., Власов А.С., Гузман И.Я., Лукин Е.С., Мосин Ю.М., Скидан Б.С. Химическая технология керамики. Учеб. пособие для вузов. Под ред. И.Я. Гузмана. М., ООО РИФ "Стройматериалы", 2011. 496 с.
10. Лемешев В.Г., Лемешев Д.О. Химическая технология керамики и огнеупоров. М., РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2016. 123 с.
11. Горохова Е.В. Материаловедение и технология керамики. Минск, Выш. шк., 2009. 222 с.

References

1. Shakhova V.N., Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov E.S., Selivanov O.G. Keramicheskaya massa dlya izgotovleniya stenovoi i oblitsovochnoi keramiki: Zayavka na izobr. № 2018133990 ot 26.09.2018.
2. Markova A.A., Pikalov E.S., Selivanov O.G., Chukhlanov V.Yu., Podolets A.A. Kompleksnaya utilizatsiya otkhodov Vladimirskoi oblasti v proizvodstve vysokoprochnoi stroitel'noi keramiki iz mestnoi maloplastichnoi gliny. Ekologiya promyshlennogo proizvodstva. 2016. T. 20. № 3 (95). S. 14–17.
3. Vaisman Ya.I., Ketov A.A. Vozdeistvie na okruzhayushchuyu sredyu i perspektivy pererabotki stekloboya. Vestnik PNIPU. Urbanistika. 2011. № 4. S. 78–95.
4. O sostoyanii okruzhayushchei sredy i zdorov'ya naseleniya Vladimirskoi oblasti v 2016 godu: ezhegodnyi doklad. Vyp. 24. Administratsiya Vladim. obl., Departament prirodopol'zovaniya i okhrany okruzh. sredy. Vladimir: Tranzit-IKS, 2017. 118 s.
5. Pikalov E.S., Selivanov O.G., Chukhlanov V.Yu., Sukharnikova M.A. Primenenie regional'nykh tekhnogennykh otkhodov v proizvodstve stenovykh keramicheskikh izdelii. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2017. № 6. S. 24–29.
6. Sukharnikova M.A., Pikalov E.S. Issledovanie vozmozhnosti proizvodstva keramicheskogo kirpicha na osnove maloplastichnoi gliny s dobavleniem gal'vanicheskogo shlama. Uspexi sovremennogo estestvoznaniya. 2015. № 10. S. 44–47.
7. Vorob'eva A.A., Shakhova V.N., Pikalov E.S., Selivanov O.G., Sysoev E.P., Chukhlanov V.Yu. Poluchenie oblitsovochnoi keramiki s effektivom osteklovyvaniya na osnove maloplastichnoi gliny i tekhnogennogo otkhoda Vladimirskoi oblasti. Steklo i keramika. 2018. № 2. S. 13–17.
8. Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov E.S., Selivanov O.G. Ispol'zovanie otkhodov, soderzhashchikh tyazhelye metally, dlya polucheniya kislotoupornoj keramiki s effektivom samoglazurovaniya. Ekologiya promyshlennogo proizvodstva. 2018. № 2. S. 2–6.
9. Andrianov N.T., Balkevich V.L., Belyakov A.V., Vlasov A.S., Guzman I.Ya., Lukin E.S., Mosin Yu.M., Skidan B.S. Khimicheskaya tekhnologiya keramiki. Ucheb. posobie dlya vuzov. Pod red. I.Ya. Guzmama. M., OOO RIF "Stroimaterialy", 2011. 496 s.
10. Lemeshev V.G., Lemeshev D.O. Khimicheskaya tekhnologiya keramiki i ogneuporov. M., RKhtU im. D.I. Mendeleeva, 2016. 123 s.
11. Gorokhova E.V. Materialovedenie i tekhnologiya keramiki. Minsk, Vysh. shk., 2009. 222 s.

V.N. Shakhova – магистрант, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 600000 Россия, г. Владимир, ул. Горького 87, e-mail: lera_sha@list.ru • И.А. Виткалова – магистрант, e-mail: scream7687@yandex.ru • А.С. Торлова – магистрант, e-mail: astorlova@mail.ru • Е.С. Пикалов – канд. техн. наук, доцент, e-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru • О.Г. Селиванов – инженер-исследователь, e-mail: selivanov6003@mail.ru

V.N. Shakhova – Graduate Student, Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs, 600000 Russia, Vladimir, Gorky Str. 87, e-mail: lera_sha@list.ru • I.A. Vitkalova – Graduate Student, e-mail: scream7687@yandex.ru • A.S. Torlova – Graduate Student, e-mail: astorlova@mail.ru • E.S. Pikalov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, e-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru • O.G. Selivanov – Research Engineer, e-mail: selivanov6003@mail.ru