

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА, ПОЛУЧЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА АО "БЕРЕЗНИКОВСКИЙ СОДОВЫЙ ЗАВОД"

С.В. Леонтьев, В.А. Шаманов, А.Д. Курзанов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Рассмотрены результаты изучения особенностей структурообразования силикатного кирпича, полученного с применением твердых отходов производства АО "Березниковский содовый завод". Для проведения исследований из шламонакопителей отобраны различные пробы: шлам "закрытого" отстойника влажностью 5 %, шлам с поверхности открытого отстойника влажностью 35 %, увлажненный шлам с открытого отстойника влажностью 70 %. С помощью термической обработки обезвоженного шлама "закрытого" отстойника при температуре 950 °С может быть получена строительная известь, отвечающая требованиям ГОСТ 9179. По результатам оптимизации параметров формования образцов силикатного кирпича и их состава установлено, что использование извести из твердых отходов содового производства в составе известково-кремнеземистого вяжущего автоклавного твердения позволяет получать образцы силикатного кирпича с маркой по прочности М200. Исследования микроструктуры показали, что силикатные образцы, изготовленные с применением отхода содового производства, характеризуются неоднородным строением цементирующего вещества, а также недостаточным количеством образованных в процессе автоклавирования низкоосновных гидросиликатов кальция тоберморитовой группы, что обусловлено вещественным составом отхода, а именно наличием реакционно-пассивных компонентов и примесей. Повышение структурной прочности образцов, изготовленных с применением отходов содового производства, возможно благодаря увеличению удельной поверхности известково-кремнеземистого вяжущего, а также модификации вяжущего тонкодисперсными минеральными добавками.

Ключевые слова: отходы содового производства, силикатный кирпич, минералообразование, переработка, шлам карбоната кальция

Features of the Structure Formation of Silicate Bricks Obtained with the Use of Solid Waste Produced by JSC "Berezniki Soda Plant"

S.V. Leontev, V.A. Shamanov, A.D. Kurzanov

Perm National Research Polytechnic University, 614990 Perm, Russia

The results of studying the structure formation features of silicate bricks obtained with the use of solid waste produced by JSC "Berezniki soda plant" are presented in this article. Various samples, such as sludge from the "closed" sump with a moisture content of 5 %, sludge from the open sump surface with a moisture content of 35 %, moistened sludge from the open sump with a moisture content of 70 %, were taken from the sludge collectors for the research. It was established the building lime meeting the requirements of GOST 9179 can be received by means of heat treatment at 950 °C of the dehydrated slime selected from the closed settler. By results of silicate brick samples forming parameters and their structure optimization it was found that the use of lime from soda production solid waste as part of lime-silica autoclave hardening binder allows to obtain silicate bricks samples, characterized by the strength grade M200. Samples microstructure studies obtained using the methods of electron microscopic and x-ray phase analysis showed that silicate samples produced with the use of soda production waste are characterized by a cementing substance heterogeneous structure and an insufficient number of tobermorite group low-basic calcium hydrosilicates formed during autoclaving. This is due to the waste material composition, namely the presence of reactive-passive components and impurities. Increasing the structural strength of samples made with the use of soda production wastes is possible due to raising the lime-silica binder specific surface area and the binder modification with fine mineral additives.

Keywords: soda production waste, calcium silicate brick, mineral formation, recycling, calcium carbonate sludge

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-11-60-65

Одним из крупнейших предприятий химической промышленности Пермского края, технологический процесс которого предусматривает образование значительного количества отходов, негативно влияющих на окружающую среду, является АО "Березниковский содовый завод" (г. Березники). В частности, в процессе по-

лучения кальцинированной соды на данном предприятии образуется побочный продукт — дистиллерная жидкость, состоящая из твердой и жидкой фазы. Дистиллерная жидкость в объеме 9–10 м³/т соды направляется на механическое обезвоживание в шламонакопители ("белые моря"), в которых происходит сбор и хранение твердых отходов со-

дового производства (ТОС) (200–250 кг/т соды). На сегодняшний день на территории предприятия расположено два шламонакопителя: закрытый (недействующий) и открытый (действующий), общий объем содержащихся отходов в которых уже превышает 20 млн т [1]. Образование таких объемов твердых и жидких отходов не только



Рис. 1. Внешний вид различных проб отхода содового производства:

а – шлам закрытого отстойника влажностью 5 %; б – шлам с поверхности открытого отстойника с влажностью 35 %; в – увлажненный шлам с глубины влажностью 70 %

Fig. 1. Appearance of various samples of waste soda production:

a – sludge closed sump moisture 5 %; b – sludge from the surface of an open sump with a moisture content of 35 %; c – moistened sludge with a humidity depth of 70%

загрязняет окружающую среду, но и препятствует развитию действующего производства, требует отвода дополнительных площадей земли для организации шламонакопителей и дополнительных затрат, связанных с их строительством и эксплуатацией.

Наиболее рациональным способом снижения негативного влияния вышеперечисленных факторов на хозяйственно-экономическую деятельность предприятия является разработка технологии эффективной утилизации и переработки отходов содового производства в различных отраслях народного хозяйства, в том числе и в такой материалоёмкой отрасли, как производство строительных материалов и изделий [2–4].

Согласно технологическому регламенту производства кальцинированной соды, твердые отходы образуются на стадиях обжига известняка и рассолоочистки. Рассол хлористого натрия, применяемый в производстве, кроме основного вещества содержит примеси кальциевых и натриевых солей, которые при поглощении аммиака и углекислого газа образуют труднорастворимые соединения — карбонаты кальция и магния [5]. Таким образом, все отходы, содержащиеся в отстойнике шламонакопителя, можно разделить на три вида:

- обезвоженный шлам (твёрдая фаза);
- отстоявшийся шлам (имеется четкая граница раздела фаз);
- увлажненный шлам (водная суспензия).

С целью проведения дальнейших исследований, направленных на изучение структуры и

свойств силикатного кирпича, изготовленного с применением отходов содового производства, из шламонакопителей были отобраны три пробы:

- № 1. Шлам закрытого отстойника влажностью 5 % (рис. 1, а);
- № 2. Шлам с поверхности открытого отстойника с влажностью 35 % (рис. 1, б);
- № 3. Увлажненный шлам с глубины влажностью 70 % (рис. 1, в).

Насыпная плотность отхода в сухом состоянии составляет 960 кг/м^3 , его усредненный гранулометрический состав представлен ниже.

Размер ячеек сит, мм2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,05	<0,05
Частный остаток на сите, %	...0,8	2,1	6,2	18,3	29,6	38,5	4,5

Результаты определения состава основных компонентов обезвоженного шлама приведены ниже.

КомпонентCaCO ₃	MgCO ₃	Ca(OH) ₂	CaCl ₂	SiO ₂ +Al ₂ O ₃	CaSO ₄	SiO ₂
Содержание, %	...50–65	20–25	5–10	5–10	5–10	3–10	0–5

Анализ представленных данных свидетельствует о потенциальной возможности применения отхода в производстве различных строительных материалов. Наиболее полноценно и рационально представляется использование отхода в качестве компонента известково-кремнеземистого вяжущего автоклавного твердения, применяемого, в частности, при производстве силикатного кирпича.

Для получения известково-кремнеземистых вяжущих автоклавного твердения карбонаты кальция и магния, содержащиеся в значительном количестве в составе отхода, необходимо декарбонизировать для получения

реакционно-активных оксидов. В последующем при автоклавной обработке они совместно с оксидом кремния будут участвовать в процессе минералообразования гидросиликатов кальция различной основности, формирование которых обеспечивает силикатному кирпичу необходимые прочность и долговечность [6].

Для получения содержащего известь компонента известково-кремнеземистого вяжущего была определена оптимальная температура обжига отхода содового производства. Для этого по три навески от каждой пробы (проба № 1–3) высушивались при

температуре $105 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, измельчались в фарфоровой ступке до крупности менее $0,315 \text{ мм}$ и подвергались обжигу в диапа-

зоне температур $750\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ с шагом $50 \text{ }^\circ\text{C}$. После обжига для каждой из навесок определялись значения потери массы, а также температуры гашения полученных оксидов. Усредненные результаты испытаний представлены в табл. 1.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что экзотермическая реакция гашения обожженного при температурах от 750 до $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ отхода наблюдается только для пробы № 1, при этом оптимальной температурой обжига можно считать температуру $950 \text{ }^\circ\text{C}$. Именно при такой температуре наиболее полно протекает реакция декарбонизации с образо-

Таблица 1. Результаты испытания проб при различных температурах обжига

Table 1. Test results for samples at different firing temperatures

Номер пробы	Т _{обжига} , °С									
	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200
ППП, %										
1	0,11	0,14	0,31	0,40	0,37	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
2	0,09	0,12	0,30	0,41	0,41	0,42	0,42	0,42	0,43	0,43
3	0,09	0,19	0,33	0,41	0,45	0,44	0,44	0,47	0,44	0,44
Температура гашения, °С										
1	28,0	44,0	64,0	72,0	80,0	62,0	56,0	46,0	36,0	26,0
2	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
3	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0

ванием активных оксидов кальция и магния.

Полученный после обжига при T = 950 °С продукт (проба № 1) был испытан на соответствие требованиям ГОСТ 9179. Установлено, что обожженный отход производства соды соответствует требованиям, предъявляемым к негашеной доломитовой извести 3-го сорта с добавками, а также гидратной извести 2-го сорта с добавками.

На следующем этапе работы оценивали возможность использования полученного в процессе обжига материала в качестве компонента известково-кремнеземистого вяжущего автоклавного твердения применительно к технологии производства силикатного кирпича. Для этого подбирались оптимальное соотношение обожженного отхода содового производства и песка, а также требуемые формовочная влажность смеси и давление прессования. В качестве контрольного использовался состав, изготовленный с применением совместно измельченных извести

и песка. Для проведения исследования были использованы: песок Пролетарского месторождения (г. Пермь), удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736; кальциевая негашеная известь второго сорта производства АО "ПЗСП", удовлетворяющая требованиям ГОСТ 9179; вода водопроводная по ГОСТ 23732.

Технология получения образцов силикатного кирпича включала следующие операции: 1) сушка отхода (обезвоженный шлам с закрытого отстойника) при температуре 105±2 °С; 2) измельчение зерен до крупности менее 0,315 мм; 3) обжиг отхода в муфельной печи при температуре 950 °С; 4) гашение обожженного отхода водой с перемешиванием (3–4 ч); 5) совместный помол отхода с песком до удельной поверхности 3500 см²/г; 6) увлажнение полученной смеси; 7) формование образцов-цилиндров (d = 50 мм, h = 90 мм) на гидравлическом прессе; 8) обработка отформованных образцов в промышленном ав-

токлаве (режим: 2+6+2 ч, T = 180 °С, P_{изб} = 10 атм).

Основными технологическими параметрами на этапе формования, оказывающими значительное влияние на формирование оптимальных структуры, и, как следствие, на конечные физико-механические характеристики образца-сырца, являются такие факторы, как влажность сырьевой смеси и давление прессования. Оптимальные значения вышеперечисленных параметров определяли на смесях контрольного состава с соотношением компонентов 1:1. Влажность формовочной смеси изменялась от 4 до 8 %, а усилие прессования составляло 3000–9000 кгс.

Выбор интервалов варьирования указанных выше факторов обусловлен тем, что с увеличением влажности сырца давление прессования уменьшается. В свою очередь, избыточная влажность смеси не дает спрессовать кирпич-сырец, извлечь его из пресс-формы и отправить в автоклав. Чрезмерное уменьшение влажности приводит к тому, что пресс работает с так называемой "запрессовкой", т.е. спрессованный кирпич-сырец расслаивается и рассыпается, что не удовлетворяет требованиям по прочности отформованного сырца, которая должна быть не ниже 0,3 МПа [7].

У отпрессованных образцов (сырцов) определялась средняя плотность и прочность при сжатии. По результатам испытаний установлено, что наибольшая прочность сырца, изготовленного как с применением традиционного вяжущего, так и с вяжущим на основе отхода содового производства, достигается при следующих технологических параметрах: влажность формовочной смеси — 6 %; усилие прессования — 5000 кгс; скорость нагружения — 100 кгс/с.

Соблюдение вышеперечисленных параметров формования обеспечивает получение максимально плотной, однородной по всему объему структуры материала, что обеспечивает наилучшие показатели качества образца и его долговечность.

На следующем этапе исследования определялось оптимальное соотношение между



Рис. 2. Прочность силикатных образцов, изготовленных с использованием известково-кремнеземистого вяжущего с различным соотношением компонентов

Fig. 2. Strength of silicate samples made using lime-siliceous binder with a different ratio of components

обожженным гидратированным отходом и песком. Для этого были приняты следующие соотношения компонентов (ТОС:Песок и Известь:Песок) = 1:0,25; 1:0,5; 1:0,75; 1:1; 1:1,25; 1:1,5; 1:1,75; 1:2,0, 1:2,5.

Результаты испытаний образцов после автоклавной обработки представлены на рис. 2.

Также у полученных образцов определялись такие физико-механические характеристики, как средняя плотность, водопоглощение и коэффициент размягчения.

Анализ полученных данных показывает, что использование отходов ТОС в составе известково-кремнеземистого вяжущего позволяет получать силикатные материалы, по своим физико-механическим характеристикам не многим уступающие материалам, полученным по традиционной рецептуре. Наилучшими характеристиками обладают силикатные образцы контрольного состава с соотношением компонентов Известь:Песок = 1:2, прочность на сжатие которых составила 35,67 МПа, что соответствует марке силикатного кирпича М300 (ГОСТ 379). Лучшими показателями прочности на сжатие у образцов, изготовленных с применением ТОС, характеризуются образцы с аналогичным контрольному составом компонентов (ТОС:Песок = 1:2). Прочность на сжатие таких образцов составила 22,1 МПа, что соответствует марке по прочности М200 (ГОСТ 379). Результаты испытаний физико-механических характеристик представлены в табл. 2.

Для выявления причины получения образцов, изготовленных с применением ТОС, характеризующихся невысокой в сравнении с контрольными образцами прочностью, были проведены исследования их структуры и фазового состава минералогических образований [8].

Микроструктуру образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа S-3400N фирмы "Hitachi". Количественная и качественная оценка процессов минералогического образования выполнялась с помощью рентгеновского дифрактометра XRD-7000 фирмы "Shimadzu". Обработка рентге-

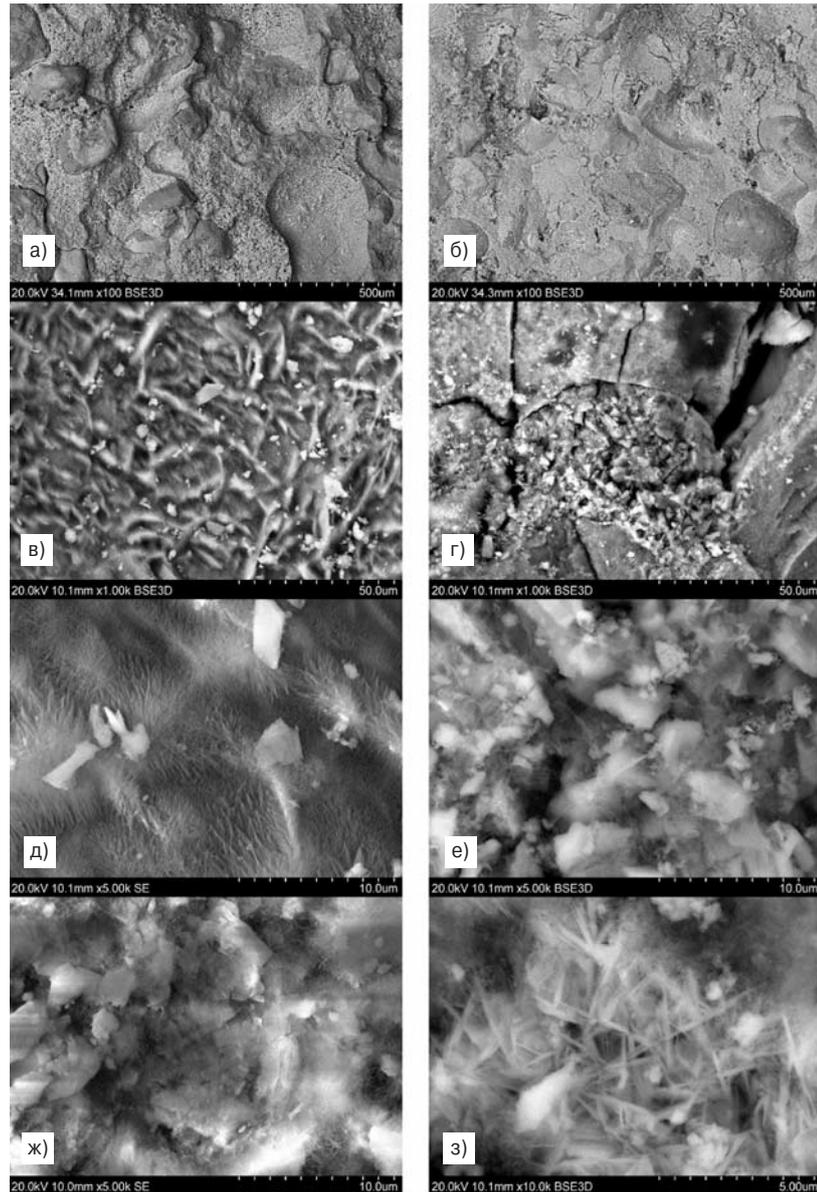


Рис. 3. Микрофотографии образцов силикатного кирпича:

а, в, д, ж – образцы контрольного состава; б, г, е, з – образцы силикатного кирпича, изготовленные с применением твердого отхода содового производства

Fig. 3. Microphotographs of silicate brick samples:

a, c, d, g – samples of the control composition; b, d, e, s – silicate brick samples made using solid waste from soda production

нограмм производилась с использованием программного обеспечения "XRD 6000/7000 Ver. 5.21". Микрофотографии исследуемых образцов представлены на рис. 3.

Необходимо отметить, что для создания прочного композита в технологии силикатных строительных материалов предпочтительным является формирование в процессе автоклавной

Таблица 2. Физико-механические характеристики образцов оптимального состава, изготовленные с применением ТОС

Table 2. Physico-mechanical characteristics of samples of optimal composition made using SVS

Характеристики	Известь:Песок = 1:2	ТОС:Песок = 1:2
Средняя плотность, кг/м ³	1900	1820
Прочность при сжатии, МПа	35,3	22,1
Водопоглощение по массе, %	6	8
Коэффициент размягчения, б/р	0,9	0,8

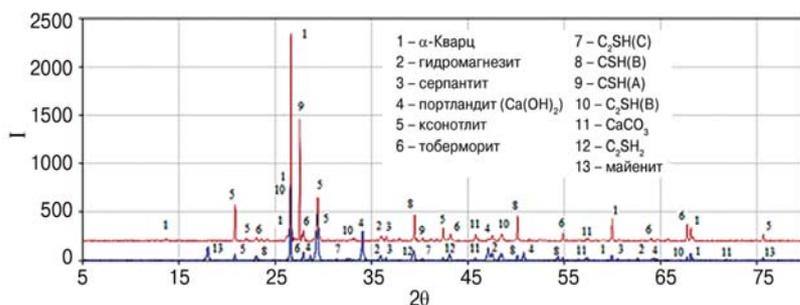


Рис. 4. Рентгенограммы образцов силикатного кирпича
 Fig. 4. XRD patterns of silicate brick samples

обработки плотной однородной структуры, состоящей из спутано-волоконистых низкоосновных гидросиликатов кальция преимущественно тоберморитовой группы [9].

Анализ микрофотографий образцов, изготовленных с применением ТОС (см. рис. 3, б, з), показывает наличие трещин, неоднородности структуры цементирующего вещества, что объясняется наличием в составе содового отхода веществ и компонентов, не участвующих в процессе минералообразования силикатного композита. В свою очередь, результаты рентгенографического исследования образцов (рис. 4) показали, что входящие в состав отхода соединения магния, алюминия и кремния в процессе автоклавной обработки образуют гидросиликаты типа серпантин ($3\text{MgO} \times 2\text{SiO}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$) или гидромагнезит ($4\text{MgCO}_3 \times \text{Mg}(\text{OH})_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$) и, вероятно, гидросиликаты $\text{C}_2\text{SH}(\text{C})$ и майенит ($12\text{CaO} \times 7\text{Al}_2\text{O}_3$) [10], прочность которых значительно ниже прочности низкоосновных гидросиликатов кальция.

В результате изучения структуры и характера минералообразования образцов после автоклавной обработки выявлено, что в контрольных образцах (см. рис. 3, а, в) наблюдается формирование ксонотлита — ленточно-го силиката, являющегося продуктом трансформации 11А-тоберморита, вносящего основной вклад в формирование прочностных свойств силикатных конгломератов [11, 12].

На рис. 3, д, е (увеличение $\times 5000$) у контрольных образцов можно наблюдать присутствие несвязанных пластинок гидроксида кальция и образование низкоосновных гидросиликатов

кальция (преимущественно ксонотлита), тонкие иглы и волокна которого кристаллизуются в аморфной гелевидной кремнекислоте на периферии сохранившихся зерен кварца, перпендикулярно к их поверхности. Аморфная кремнекислота выделяется на поверхности листовых кристаллов тоберморита, а также на стенках пор и капилляров (см. рис. 3, а), что вносит свой вклад в формирование прочной структуры материала.

Иная картина наблюдается в микротрещинах образцов, изготовленных с применением отхода. В этом случае продукты твердения представлены преимущественно в виде геля и отличаются весьма слабым вовлечением кварца в реакцию с гидроксидом кальция (портландит), который имеет форму несвязанных пластинок, присутствующих во всем объеме материала. Слоистые гелевидные гидросиликаты кальция, имеющие субмикросталлическое строение ряда $\text{C}_2\text{SH}_2 - \text{CSH}(\text{B})$, и тобермориты с $d = 3,07 \cdot 10^{-10}$ м (см. рис. 4), имеют переменный состав и слабо закристаллизованы. На рис. 3, з наблюдаются незначительные локации с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция игльчато-волоконистой структуры группы $\text{CSH}(\text{B})$ с составом $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_n$. Линии этой фазы обнаружены также на рентгенограмме (см. рис. 4) и имеют малую интенсивность. Игольчатые кристаллы, локальные скопления которых наблюдаются в структуре образцов, изготовленных с применением отхода (см. рис. 3, з), также могут быть образованы за счет гидратации извести в присутствии содержащихся в отходе сульфатов, кото-

рые группируются в звездчатые агрегаты и не играют заметной структурообразующей роли. Основой цементирующего вещества являются мелкие, но относительно хорошо закристаллизованные игльчатые листочки и пластинки (см. рис. 3, е) [13].

В цементирующем веществе контрольных образцов (см. рис. 3, ж) наблюдаются участки с непрерывным каркасом, сформированным пластинчатым гидросиликатом типа $\text{CSH}(\text{A})$, о чем свидетельствует появление линий с $d = 3,21 \cdot 10^{-10}$ м и $d = 2,23 \cdot 10^{-10}$ м на рентгенограмме (см. рис. 4). Также в структуре контрольных образцов наблюдается большое количество прочных скрытокристаллических сростков низкоосновных фаз — тоберморита и волоконистого гидросиликата типа $\text{CSH}(\text{B})$. Образование такой микроструктуры цементирующего вещества определяет более высокие показатели прочности контрольных образцов по отношению к прочности образцов, изготовленных с применением ТОС.

Таким образом, в ходе проведенных исследований было установлено, что благодаря обжигу обезвоженного шлама при температуре 950°C может быть получен продукт, соответствующий требованиям, предъявляемым к строительной извести, использование которого в качестве компонента известково-кремнеземистого вяжущего при производстве силикатного кирпича представляется наиболее рациональным.

По результатам испытаний определено, что при соотношении компонентов в известково-кремнеземистом вяжущем ТОС:Песок = 1:2 могут быть получены образцы силикатного кирпича, которые по своим значениям физико-механических характеристик соответствуют требованиям нормативно-технической документации, но уступают аналогичным характеристикам силикатного кирпича, изготовленного на рядовых материалах без использования твердых отходов содового производства. Это связано с неоднородным строением цементирующего вещества, а также недостаточным количеством об-

разованных в процессе автоклавирования низкоосновных гидросиликатов кальция тоберморитовой группы, что обусловлено вещественным составом отхода, а именно наличием реакционно пассивных компонентов и примесей.

Изучение особенностей формирования структуры полученных образцов позволило установить, что улучшение процесса минералообразования и, как следствие, повышение структурной прочности образцов, изготовленных с приме-

нием отходов содового производства, возможно благодаря увеличению удельной поверхности известково-кремнеземистого вяжущего, а также модификации вяжущего тонкодисперсными минеральными добавками.

Литература

1. Калинина Е.В., Рудакова Л.В. Снижение токсичных свойств шламов содового производства с последующей их утилизацией. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 6. С. 85–96.
2. Вагапов Р.Ф., Синицин Д.А., Оратовская А.А., Тэненбаум Г.В. Использование отходов промышленных предприятий при производстве строительных материалов на примере республики Башкортостан. Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. №3 (54). С. 76–82.
3. Калинина Е.В. Утилизация шламов карбоната кальция в производстве товарных продуктов строительной отрасли. Вестник ПНИПУ. Урбанистика. 2012. № 1. С. 97–113.
4. Kasikowski, T., Buczkowski, R., Dejewski, B., Lemanowska, E., Iglinski B. Utilization of distiller waste from ammonia-soda processing. Journal of cleaner production. 2004. № 12(7). P. 759–769.
5. Крепышева И.В., Рудакова Л.В., Козлов С.Г. Физико-химические и токсикологические свойства шлама содового производства. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №1. С. 335–341.
6. Бутт Ю.М., Куатбаев К.К. Долговечность автоклавных силикатных бетонов. М., Стройиздат, 1966. 216 с.
7. Вахнин М.П., Анищенко А.А. Производство силикатного кирпича. М., Высшая школа, 1989. 200 с.
8. Горшков В.С., Тимашев В.В. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М., Высшая школа, 1963. 287 с.
9. Кржеминский С.А. К вопросу о динамике процесса твердения силикатных материалов на основе известки. Сб. трудов РОСНИИМСа. № 5. М., Промстройиздат, 1953. 256 с.
10. Ларионова З.М., Виноградов Б.Н. Петрография цементов и бетонов. М., Стройиздат, 1974. 347 с.
11. Овчаренко Г.И., Михайленко А.А. Взаимосвязь прочности и фазового состава автоклавного известково-зольного камня. Известия вузов. Строительство. 2014. № 1. С. 26–32.
12. Нелюбова В.В., Жерновский И.В., Строкова В.В., Безродных М.В. Силикатные материалы автоклавного твердения с наноструктурированным модификатором в условиях высокотемпературных воздействий. Строительные материалы. 2012. № 9. С. 8–10.
13. Тейлор Х. Химия цемента. Пер. с англ. М., Мир, 1996. 560 с.

References

1. Kalinina E.V., Rudakova L.V. Snizhenie toksichnykh svoystv shlamov sodovogo proizvodstva s posleduyushchei ikh utilizatsiei. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. 2018. T. 329. № 6. S. 85–96.
2. Vagapov R.F., Sinitsin D.A., Oratovskaya A.A., Tenenbaum G.V. Ispol'zovanie otkhodov promyshlennykh predpriyatii pri proizvodstve stroitel'nykh materialov na primere respubliky Bashkortostan. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2014. №3 (54). S. 76–82.
3. Kalinina E.V. Utilizatsiya shlamov karbonata kal'tsiya v proizvodstve tovarnykh produktov stroitel'noi otrasli. Vestnik PNIPU. Urbanistika. 2012. № 1. S. 97–113.
4. Kasikowski, T., Buczkowski, R., Dejewski, B., Lemanowska, E., Iglinski B. Utilization of distiller waste from ammonia-soda processing. Journal of cleaner production. 2004. № 12(7). P. 759–769.
5. Krepysheva I.V., Rudakova L.V., Kozlov S.G. Fiziko-khimicheskie i toksikologicheskie svoystva shlama sodovogo proizvodstva. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). 2015. №1. S. 335–341.
6. Butt Yu.M., Khatbaev K.K. Dolgovechnost' avtoklavnykh silikatnykh betonov. M., Stroizdat, 1966. 216 s.
7. Vakhnin M.P., Anishchenko A.A. Proizvodstvo silikatnogo kirpicha. M., Vysshaya shkola, 1989. 200 s.
8. Gorshkov V.S., Timashev V.V. Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv. M., Vysshaya shkola, 1963. 287 s.
9. Krzheminskii S.A. K voprosu o dinamike protsesa tverdeniya silikatnykh materialov na osnove izvesti. Sb. trudov ROSNIIMSa. № 5. M., Promstroizdat, 1953. 256 s.
10. Larionova Z.M., Vinogradov B.N. Petrografiya tsementov i betonov. M., Stroizdat, 1974. 347 s.
11. Ovcharenko G.I., Mikhailenko A.A. Vzaimosvyaz' prochnosti i fazovogo sostava avtoklavnogo izvestkovo-zol'nogo kamnya. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2014. № 1. S. 26–32.
12. Nelyubova V.V., Zhernovskii I.V., Stroikova V.V., Bezrodnykh M.V. Silikatnye materialy avtoklavnogo tverdeniya s nanostrukturirovannym modifikatorom v usloviyakh vysokotemperaturnykh vozdeistvii. Stroitel'nye materialy. 2012. № 9. S. 8–10.
13. Teilor Kh. Khimiya tsementa. Per. s angl. M., Mir, 1996. 560 s.