

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-28-36

Агеева М.С., Фомина Е.В., Кикалишвили Д.Г., Шаповалова А.В.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: ageevams@yandex.ru*

РАЗРАБОТКА ЩЕЛОЧЕАКТИВИРОВАННЫХ ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОЛОКНИСТЫХ ОТХОДОВ

Аннотация. Представленные в работе исследования направлены на решение вопросов утилизации техногенных отходов, как одного из наиболее важных в последнее время направлений, а именно, при производстве и эксплуатации утеплителя на основе каменной ваты. Возрастание отходов минеральной ваты связано с ее высокой востребованностью в строительной отрасли, как тепло- и звукоизолирующего материала. Причем доля отходов пропорционально возрастает и от ее производства, и от эксплуатации. Степень утилизации от производства остается высокой, путем повторного использования в качестве сырья, а от эксплуатации – низкой. В связи с этим применение отходов производства строительных материалов, образующихся от сноса зданий и сооружений стало одной из важнейших задач современного общества.

Важным свойством техногенных отходов от минерального утеплителя, влияющим на эффективность его вторичного использования, является химический состав, определяемый типом исходного минерального сырья, а, особенно, наличие аморфных силикатных фаз в этом материале. В исследовании была изучена возможность использования тонкомолотых отходов базальтоволокнистого утеплителя ($S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$) при получении щелочеактивированного вяжущего, а также проведена оптимизация концентрации активатора твердения. Рекомендовано использовать отходы в количестве не менее 58 %. При этом доля NaOH должна составить 0,2–0,3, а отношение вода/отход должно быть в пределах 0,35–0,4. Пересыщение раствора щелочью не приводит к значительному повышению прочностных характеристик материала, поэтому является нецелесообразным с экономической точки зрения.

Ключевые слова: щелочеактивированные вяжущие, техногенные отходы, базальтовый утеплитель, энергоэффективность строительства.

Введение. Повышение требований к энергоэффективности зданий и сооружений способствовало расширению использования теплоизоляционных материалов в строительстве и, следовательно, увеличению их отходов [1, 2]. Среди них можно выделить группу минераловатных утеплителей, куда относятся каменная вата, минеральная вата, стекловата и др., основными источниками отработанного волокнистого материала в которой являются, в меньшей степени, отходы, образующиеся при производстве, и в большей – в результате сноса зданий и сооружений. Ежегодно миллионы тонн отходов минераловатных утеплителей накапливаются на свалках и отрицательно влияют на окружающую среду. Так, по прогнозам некоторых ученых [3], их количество к 2030 году может увеличиться до 2,82 миллионов тонн.

Попадая на свалки, утеплитель, имея пористую структуру, накапливает большое количество загрязнителей, что в целом осложняет его дальнейшую переработку [4]. Однако существуют различные способы предварительной и повторной обработки подобных отходов, позволяющие решить данную проблему. Например, нагревание, промывка и измельчение. Последний

способ представляет особый интерес, так как позволяет получить гомогенную смесь частиц, которую возможно использовать при производстве различных строительных композитов. В этом случае положительным фактором будет являться получаемая развитая удельная поверхность механически активированного продукта.

Важным свойством техногенных отходов минерального утеплителя, влияющим на эффективность ее вторичного использования, является химический состав, определяемый типом исходного минерального сырья, и, особенно, наличие аморфных силикатных фаз в этом материале. Известно, что параметры и условия процесса получения волокон влияют и на их размер – образуются волокна различной длины и ширины, а также на образование большего или меньшего количества сферических частиц – «корольков». При тонкофракционном измельчении таких материалов и в условиях щелочной активации они обладают вяжущими свойствами и могут быть использованы для получения щелочеактивированного вяжущего [3, 5–6]. Такие вяжущие образуются в ходе реакций растворения и дальнейшего химического взаимодействия алюмосиликатных соединений в сильнощелочной среде.

Материалы на основе щелочеактивированных вяжущих при оптимизации состава могут сочетать в себе высокие прочностные, защитные и экологические свойства [7–9], а также быть технологичными, экономичными и являться эффективными для многих отраслей современной строительной индустрии [10], обеспечивающих их эксплуатацию в экстремальных условиях. При этом решается проблема выбросов CO_2 , которые образуются при производстве цемента. По оценкам ученых, геополимерный бетон с минеральной ватой производит примерно на 80% меньше выбросов углекислого газа по сравнению с обычным бетоном, а конечный продукт может быть в два раза прочнее традиционного цементобетона. При этом обеспечивается экологически безопасная утилизация отходов производства и эксплуатации минераловатных утеплителей [11–14].

В работе была изучена возможность использования тонкомолотых отходов базальтоволокнистого утеплителя (БУ) для получения щелочеактивированных материалов.

Материалы и методы. Отходы производства базальтового утеплителя предварительно были высушены до постоянной массы, а затем измельчены в течение 1 минуты на планетарной мельнице до удельной поверхности $300 \text{ м}^2/\text{кг}$. Удельную поверхность вяжущих материалов определяли на приборе ПСХ-12.

С помощью 3-х факторного метода математического планирования эксперимента была осуществлена оптимизация концентрации щелочного активатора. Обработка результатов осуществлялась с помощью программ EXCEL и SigmaPlot. В качестве щелочного активатора использовались гранулы гидроксида натрия (NaOH), которые предварительно перемешивали с водой для приготовления раствора щелочи. После перемешивания раствор нагревался, поэтому осуществляли его выдержку в течение минуты для остывания.

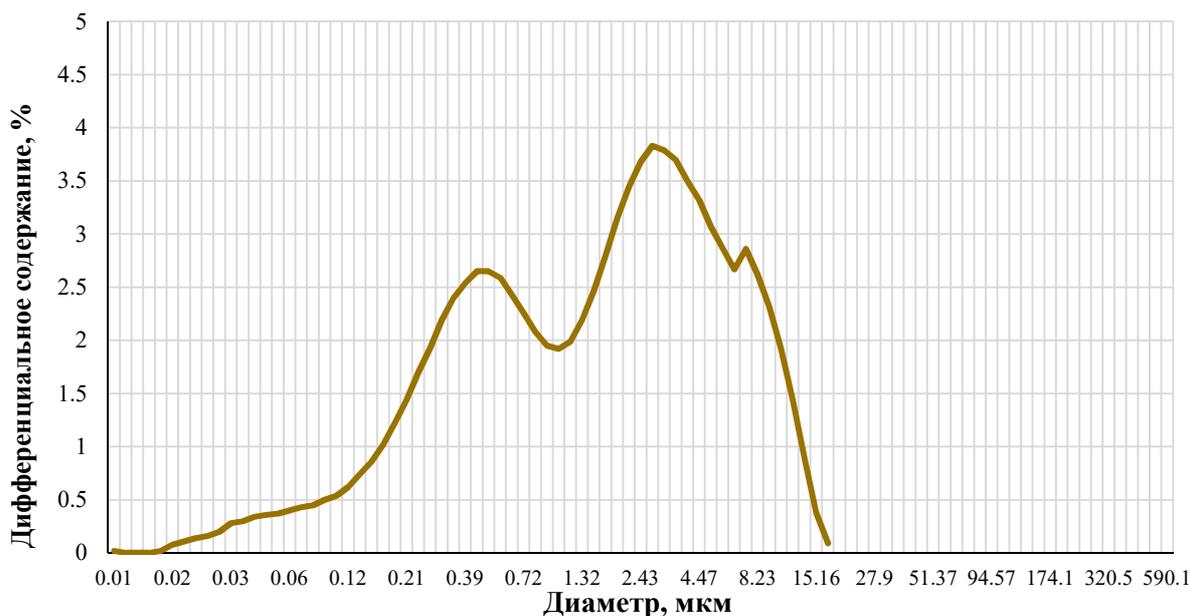
Далее осуществляли перемешивание тонкомолотых отходов производства минерального утеплителя (ТМУ) и раствора щелочи в течение 5 минут. Были зафрормованы образцы-кубики размером $2 \times 2 \times 2 \text{ см}$, при необходимости уплотняемые штыковкой. Образцы предварительно выдерживались в течение суток в камере нормального твердения, а затем осуществлялась их сушка при температуре $65 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 6 ч. Далее образцы остывали в закрытом сушильном шкафу в течение 12 часов. Затем хранились в естественных условиях в течение 7 суток. Далее определяли их прочность при сжатии.

Химический состав и график распределения частиц по размерам молотых отходов ТМУ приведен в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1

Химический состав отходов производства базальтоволокнистого утеплителя

Оксиды	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$	Другое
Базальтовое волокно	44,11	12,26	9,44	16,00	13,19	2,971	2,27

Рис. 1. Распределение частиц отхода ТМУ по размерам $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$

На графике отчетливо видно, что кривая распределений частиц по размерам находится в диапазоне 0,02–16 мкм, т.е. смещена в область мелких значений. Имеет два явных пика в диапазоне 0,21–0,72 мкм и 1,32–8,23 мкм (рис. 1). Наличие тонкодисперсных частиц обеспечивает возрастание поверхности их контакта, что значительно активизирует процессы взаимодействия компонентов при твердении.

Основная часть. Рассматриваемая щелочеактивированная вяжущая система по своему компонентному составу способна реализовать процесс структурообразования по геополимерному принципу. В работе Дж. Давидовича [15] отмечается, что для синтеза прочных геополимерных материалов необходимо соблюдать условия, при которых соотношения в сырье $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ колеблются в пределах 3,5–4,5. В этом случае образуется достаточное количество активного оксида Si и Al в щелочной среде вяжущего. В отходе ТМУ соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,59$.

Однако в исследованиях [16] говорится, что прочность при сжатии образцов геополимеров из отходов производства минеральной ваты увеличивается в 2,5–3 раза с увеличением модуля кис-

лотности отхода с 1 до 1,4. Дальнейшее увеличение модуля кислотности до 2 приводит к падению прочности при сжатии почти на 40 %. Расчетный модуль кислотности отхода тонкомолотого минерального утеплителя (Мк) составил 1,93.

Для проведения оптимизации концентрации активатора твердения для щелочеактивированного вяжущего в качестве варьируемых факторов были выбраны:

- массовая доля тонкомолотых отходов минерального утеплителя в составе вяжущего, (x1);
- массовая доля гидроксида натрия NaOH, (x2).
- отношение воды (В) к ТМУ, (x3).

В качестве функции отклика была выбрана прочность на сжатие в возрасте 7 суток, $R_{сж}$, МПа.

По результатам поисковых экспериментальных исследований были определены диапазоны варьирования факторов (табл. 2).

Матрица планирования, на основании которой проводились экспериментальные исследования, представлена в таблице 3.

Таблица 2

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования
	-1	0	1	
x1 – доля ТМУ	0,6	0,9	1,2	0,3
x2 – доля NaOH	0,2	0,3	0,4	0,1
x3 – В/ТМУ	0,35	0,45	0,55	0,1

Таблица 3

Матрица планирования и результаты эксперимента

№ состава	Кодированное значение переменных			Значение переменных в натуральном выражении			Состав смеси, %			Концентрация раствора щелочи, %	$R_{сж}$, МПа
	x1	x2	x3	ТМУ	NaOH	В/ТМУ	ТМУ	NaOH	В		
1	1	1	1	1,2	0,4	0,55	53	18	29	37,7	4,24
2	-1	1	1	0,6	0,4	0,55	45	30	25	54,8	1,3
3	1	-1	1	1,2	0,2	0,55	58	10	32	19	11
4	-1	-1	1	0,6	0,2	0,55	53	18	29	37,7	3,98
5	1	1	-1	1,2	0,4	0,35	59	20	21	48,7	10
6	-1	1	-1	0,6	0,4	0,35	50	33	17	65,6	2,08
7	1	-1	-1	1,2	0,2	0,35	66	11	23	24,4	9,74
8	-1	-1	-1	0,6	0,2	0,35	59	20	21	48,7	9,5
9	1	0	0	1,2	0,3	0,45	58,9	15,1	26	35,7	7,2
10	-1	0	0	0,6	0,3	0,45	51	26	23	52,6	3,1
11	0	1	0	0,9	0,4	0,45	53	23	24	49,7	3,5
12	0	-1	0	0,9	0,2	0,45	60	13	27	33	7,8
13	0	0	1	0,9	0,3	0,55	53	18	29	37,7	4,9
14	0	0	-1	0,9	0,3	0,35	58,8	20	21,2	48,8	9,6
15	0	0	0	0,9	0,3	0,45	56	19	25	42,6	6,8

Составы 1–4, 10, 11, 13, 15 обладали более жидкой консистенцией. У состава 2 после формирования образцов наблюдалось отслаивание воды, что объясняется ее перерасходом. В составе 6 смесь была рыхлой, мало жидкой фазы.

На образцах 2, 6 и 10 после высушивания в сушильном шкафу формировался белый слой на поверхности (рис. 2). Это связано с высокой кон-

центрацией раствора щелочи и, соответственно, пересыщением состава, что приводит к выделению не вступившего в реакцию активатора в виде высолов на поверхности. У образцов 1, 4, 11 отмечена мелкопористая структура, а у составов 11, 15 – наличие более крупных пор, что связано с повышенным содержанием воды. Образцы 5, 7, 8, 10, 12, 14 не имели каких-либо дефектов.

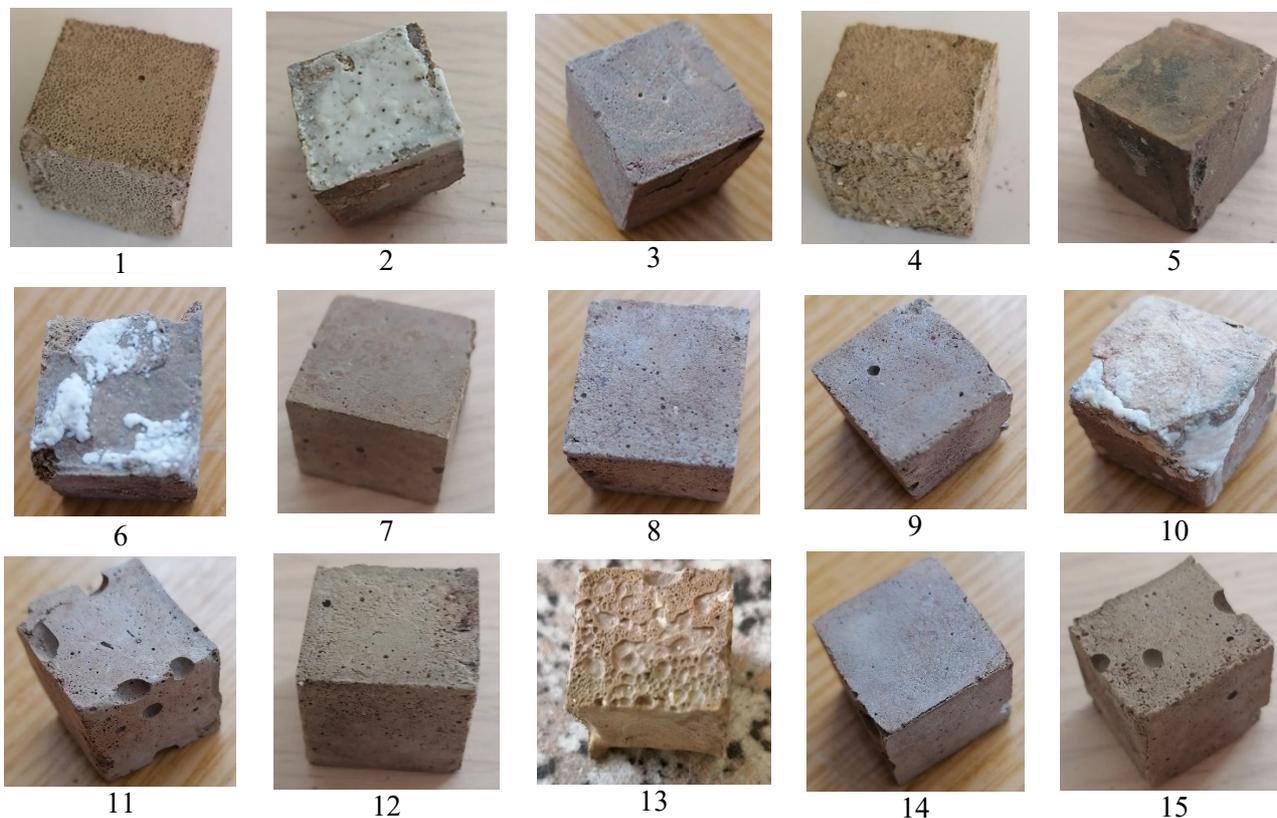


Рис. 2. Общий вид образцов щелочеактивированного вяжущего

После обработки полученных экспериментальных данных методом математического планирования были получено уравнение регрессии и

$$R_{сж} = 6,08 + 2,12X_1 - 2,19X_2 - 1,55X_3 - 0,75X_1^2 - 0,25X_2^2 + 1,35X_3^2 + 0,45X_1X_2 + 0,35X_2X_3 - 0,16X_1X_3 - 1,49X_1X_2X_3 \quad (1)$$

Адекватность модели составила 0,983.

Анализ полученного уравнения регрессии, показал, что наиболее значимыми факторами в уравнении будут являться расходы тонкомолотого ТМУ и щелочи, так как коэффициенты по абсолютному значению у них практически равны. Однако при увеличении x_1 прочность будет повышаться, а x_2 – снижаться. При возрастании отношения В/ТМУ прочность значительно снижается при всех расходах NaOH и уменьшении количества ТМУ. Положительные коэффициенты при произведении x_1 и x_2 , x_2 и x_3 говорят о возрастании прочности материала при увеличении произведения этих параметров, но снижении при одновременном увеличении всех трех (рис. 3).

его графическая интерпретация (рис. 3).

Максимальные прочности (8–11 МПа) получены у образцов 3, 5, 7, 8, 14. Проанализировав составы этих образцов, можно отметить, что расход отходов БУ во всех вариантах был выше 58% (58, 59, 66%). Сокращение количества отхода базальтоволоконного утеплителя ниже 58% приводит к падению прочности по результатам, полученным в рамках проведенного эксперимента. Пересыщение раствора щелочью также нецелесообразно с экономической точки зрения, так как не приводит к повышению прочностных характеристик материала. Таким образом, максимальные прочностные показатели достигается при расходе ТМУ 1–1,2; NaOH=0,2–0,3; В/ТМУ=0,35–0,4.

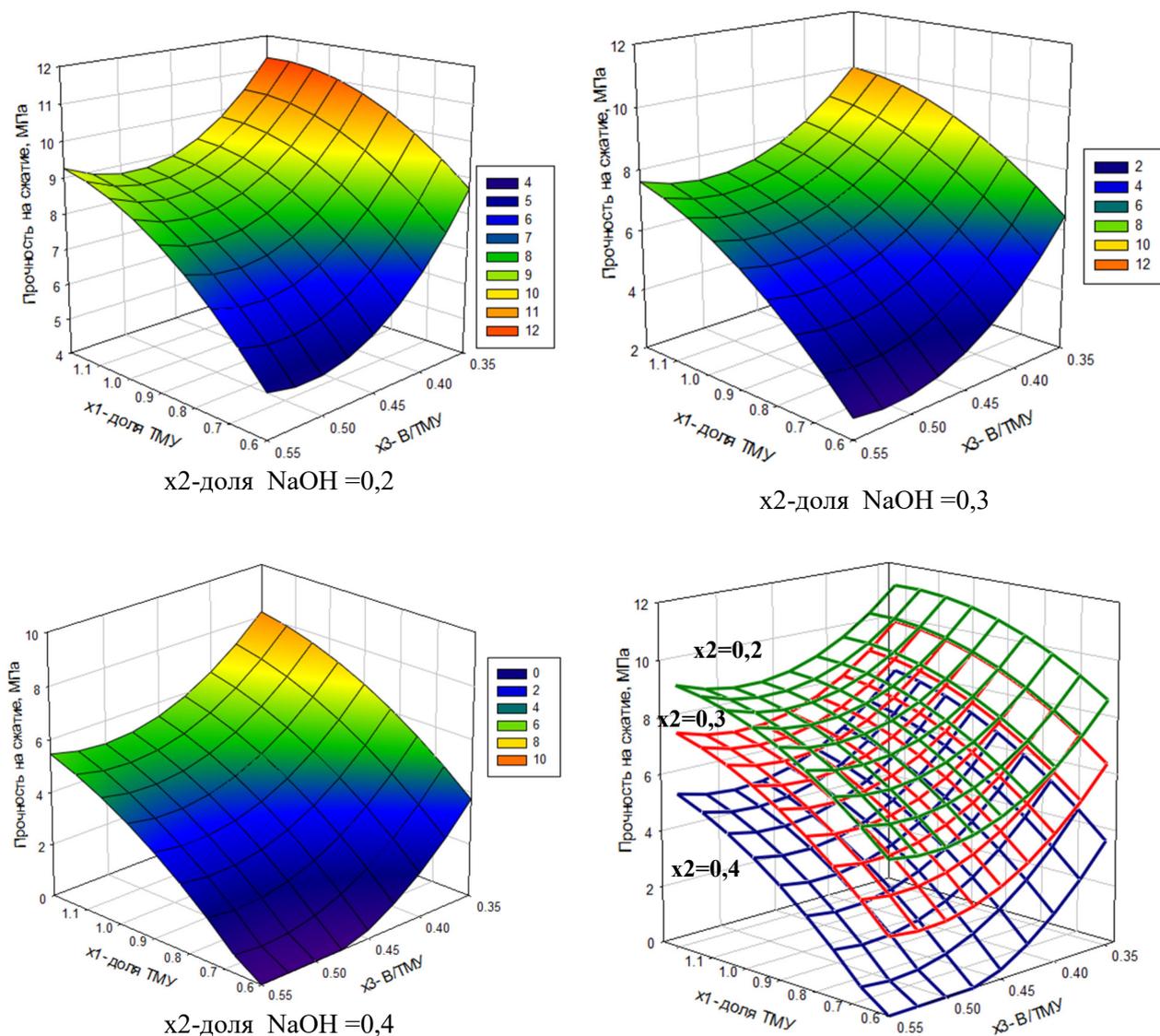


Рис. 3. Зависимость прочности щелочеактивированного вяжущего от концентрации щелочного активатора и В/ТМУ отношения

Далее была изучена микроструктура образцов 3, 5, 7, поскольку у составов 5, 8, 14 концентрация активатора практически совпадает (колеблется в пределах 48,4–48,7 %) (рис. 4).

Согласно традиционным представлениям о геополимеризации, на первой стадии кинетика процесса определяется растворением алюмосиликатных соединений и переходом в раствор ионов Na^+ , что обеспечивает повышение pH-показателя на начальном этапе полимеризации. Соединения Si-O-Si и Al-O-Si разрушаются в высококонцентрированном щелочном растворе и переходят в коллоидное состояние. Затем количество коллоидных частиц возрастает, и в результате наблюдается их уплотнение в существующем объеме, в результате структура уплотняется. Анализ микрофотографий выявил схожую структуру материалов, в которой отчетливо

прослеживаются волокна ТМУ по всей исследуемой поверхности. Наблюдается хорошее обрастание последних новообразованиями пластинчатой формы, предположительно натриевыми и кальциевыми гидроалюмосиликатами, а также присутствие значительной доли аморфной составляющей, что свидетельствует о процессе твердения вяжущего по геополимеризационному механизму. При этом у образца 3 можно заметить наличие более плотной матрицы (концентрация щелочи 19 %) с менее различимыми волокнами в общей структуре, по сравнению с составами с большей концентрацией щелочи. Тогда как у образца 5 с концентрацией раствора щелочи 48,8 % заметно увеличение толщины волокон по сравнению с другими образцами, за счет обрастания как новообразованиями, так и не вступившим в реакцию гидроксидом натрия.

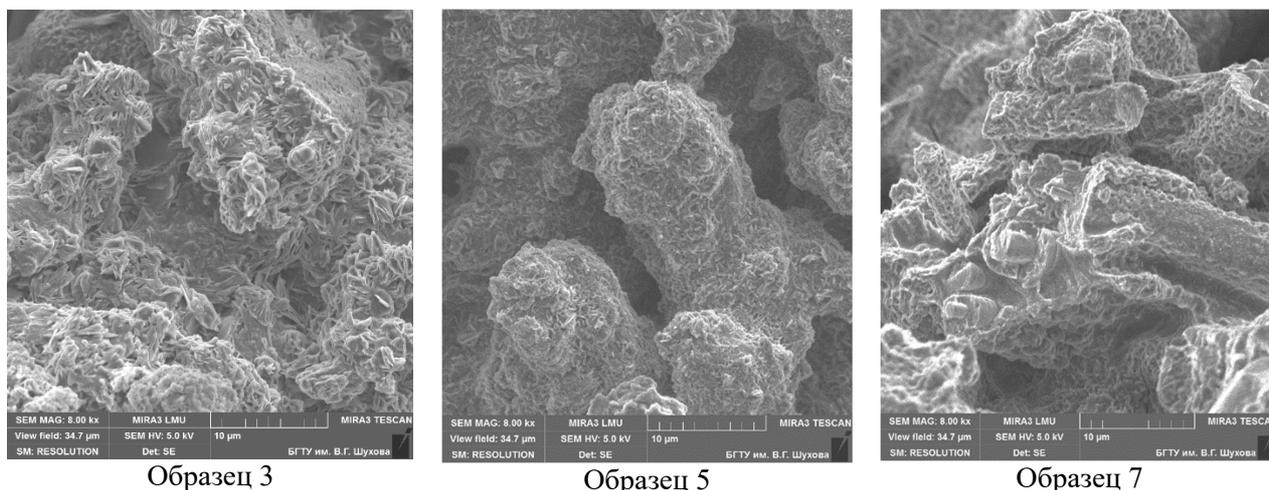


Рис. 4. Микроструктура образцов щелочеактивированного вяжущего на основе ТМУ

Выводы. Таким образом, подтверждена возможность использования тонкомолотых отходов базальтоволоконного утеплителя ($S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$) при получении щелочеактивированного вяжущего. Рекомендовано использовать отходы в количестве не менее 58 %. При этом доля NaOH должна составить 0,2–0,3, а отношение В/ТМУ должно быть в пределах 0,35–0,4. Пересыщение раствора щелочью не приводит к значительному повышению прочностных характеристик материала, поэтому является нецелесообразным с экономической точки зрения.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках национального проекта «Наука и университет» по созданию новой лаборатории «Разработка, исследования и опытно-промышленная апробация наукоемких технологий и технических средств для производства полимерсодержащих композиционных смесей и изделий из техногенных органоминеральных компонентов» (проект FZWN-2024-0002) с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. Белгород, 2016. 206 с.
2. Сулейманова Л.А. Высококачественные энергосберегающие и конкурентоспособные строительные материалы, изделия и конструкции // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. №1. С. 9–16.
3. Yliniemi J., Kinnunen P., Karinkanta P., Illikainen M. Utilization of Mineral Wools as Alkali-Activated Material Precursor // Materials. 2016. Vol. 9(5). 312. DOI: 10.3390/ma9050312
4. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Бочкин В.С., Якунин В.В., Ермаков А.А. Легкие геополимеры из отходов производства минеральной ваты // Инженерно-строительный журнал. 2020. №1(93). С. 3–12. DOI: 10.18720/MCE.93.1
5. Ding Z., Zhu M., Tam V.W.Y., Yi G., Tran C.N. A system dynamics-based environmental benefit assessment model of construction waste reduction management at the design and construction stages // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 176. Pp. 676–692. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.101
6. Tam V.W.Y., Lu W. Construction waste management profiles, practices, and performance: A cross-jurisdictional analysis in four countries // Sustainability. 2016. Vol. 8(2). 190. DOI: 10.3390/su8020190
7. Kozhukhova N.I., Lebedev M.S., Vasilenko M.I., Goncharova E.N. Ecology-toxicology study of low-calcium solid wastes from power plants // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8, No. 3. Pp. 15349–15360.
8. Kozhukhova N.I. Zhernovsky I.V., Strokova V.V. Evaluation of geopolymers biopositivity based on low-calcium fly // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10, No. 15. Pp. 35618–35620.
9. Разуева Е.А., Парфенова Л.М. Кинетика твердения золошлакощелочного вяжущего // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. 2019. № 16. С. 35–40.
10. Kozhukhova N., Kadyshchev N., Cherevatova A., Voitovich E., Lushin K. Reasonability of Application of Slags from Metallurgy Industry in Road Construction // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 692. Pp. 776–782. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_82
11. Yliniemi J., Ramaswamy R., Luukkonen T., Laitinen O., de Sousa Á.N., Huuhtanen M., Illikainen M. Characterization of mineral wool waste chemical composition, organic resin content and fiber dimensions: Aspects for valorization // Waste Manag. 2021

Vol. 131. Pp 323–330. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.06.022

12. Yliniemi J., Laitinen O., Kinnunen P., Illikainen M. Pulverization of fibrous mineral wool waste // Journal of Material Cycles and Waste Management 2018 Vol. 20. Pp. 1248–1256. DOI: 10.1007/s10163-017-0692-3

13. Nielsen E., Nørhede P., Ladefoged O., Tobiassen L., Evaluation of health hazards by exposure to Mineral wools (glass, stone/slag, HT) and proposal of a health-based quality criterion for ambient, Denmark. 2013 30 p.

14. Kinnunen P., Yliniemi J., Talling B., Illikainen M. Rockwool waste in fly ash geopolymer composites // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2016. Vol. 19. No. 3. Pp. 1220–1227. DOI: 10.1007/s10163-016-0514-z

15. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications, 5th Ed. Publisher: Geopolymer Institute. 2020. 698 p.

16. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Якунин В.В., Тувин М.Н. Структура, состав и свойства геополимеров из отходов минеральной ваты // Инженерно-строительный журнал. 2019. № 6(90). С. 3–14. DOI: 10.18720/MCE.90.1

Информация об авторах

Агеева Марина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: ageevams@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Фомина Екатерина Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: fomina.katerina@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кикалишвили Диана Геловна, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: di_ki93@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шаповалова Анастасия Валерьевна, аспирант кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: asasarov97@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 06.11.2024 г.

© Агеева М.С., Фомина Е.В., Кикалишвили Д.Г., Шаповалова А.В., 2024

**Ageeva M.S., Fomina E.V., Kikalishvili D.G., Shapovalova A.V.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: ageevams@yandex.ru*

DEVELOPMENT OF ALKALI-ACTIVATED BINDERS BASED ON BASALT FIBER WASTE

Abstract. *The research presented in the work is aimed at solving the issues of man-made waste disposal, namely in the production and operation of insulation based on stone wool, as one of the most important areas in recent times. The increase in waste of mineral wool is due to its high demand in the construction industry as a heat and sound insulation material. Moreover, the share of waste increases proportionally from both its production and operation. At the same time, utilization from production remains high, through reuse as raw materials, and from operation – low. In this regard, the use of waste from the production of building materials generated from the demolition of buildings and structures has become one of the most important tasks of modern society.*

An important property of man-made waste of mineral insulation, affecting the efficiency of its secondary use, is the chemical composition determined by the type of initial mineral raw materials, and especially the presence of amorphous silicate phases in this material. In the study, the possibility of using finely ground waste of basalt fiber insulation (Sud. = 300 m²/kg) in the production of an alkali-activated binders was studied, and the concentration of the hardening activator was optimized. It is recommended to use waste in an amount of at least 58%. At the same time, the proportion of NaOH should be 0.2–0.3, and the water/waste ratio should be within 0.35–0.4. Supersaturation of the solution with alkali does not lead to a significant increase in the strength characteristics of the material, therefore it is inexpedient from an economic point of view.

Keywords: *alkali-activated binders, man-made waste, basalt insulation, energy efficiency of construction.*

REFERENCES

1. Lesovik V.S. Geonics (geomimetics). Examples of implementation in construction materials science [Geonika (geomimetika). Primery realizatsii v stroitel'nom materialovedenii] Belgorod: BSTU 2016, 206 p. (rus)
2. Suleimanova L.A. High-quality energy-saving and competitive building materials, products and structures [Vysokokachestvennyye energosberegayushchiye i konkurentosposobnyye stroitel'nyye materialy, izdeliya i konstruksii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 1. Pp. 9–16. (rus)
3. Yliniemi J., Kinnunen P., Karinkanta P., Illikainen M. Utilization of Mineral Wools as Alkali-Activated Material Precursor. *Materials*. 2016. Vol. 9(5). 312. DOI:10.3390/ma9050312(rus)
4. Erofeev V.T., Rodin A.I., Bochkov V.S., Yakunin V.V., Ermakov A.A. Lightweight geopolymers from mineral wool production waste [Legkiye geopolimery iz otkhodov proizvodstva mineral'noy vaty] *Engineering and Construction Journal*. 2020. No. 1(93). Pp. 3–12. DOI: 10.18720/MCE.93.1
5. Ding Z., Zhu M., Tam V.W.Y., Yi G., Tran C.N. A system dynamics-based environmental benefit assessment model of construction waste reduction management at the design and construction stages. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 176. Pp. 676–692. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.12.101
6. Tam V.W.Y., Lu W. Construction waste management profiles, practices, and performance: A cross-jurisdictional analysis in four countries. *Sustainability*. 2016. Vol. 8(2). 190. DOI:10.3390/su8020190
7. Kozhukhova N.I., Lebedev M.S., Vasilenko M.I., Goncharova E.N. Ecology-toxicology study of low-calcium solid wastes from power plants. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8, No. 3. Pp. 15349–15360.
8. Kozhukhova N.I. Zhernovsky I.V., Strokova V.V. Evaluation of geopolymer binders biopositivity based on low-calcium fly. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10, No. 15. Pp. 35618–35620.
9. Razueva E.A., Parfenova L.M. Kinetics of hardening of ash-alkali binder [Kinetika tverdeniya zoloshlakoshchelochnogo vyazhushchego]. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*. 2019. No. 16. Pp. 35–40. (rus)
10. Kozhukhova N., Kadyshchev N., Cherevatova A., Voitovich E., Lushin K. Reasonability of Application of Slags from Metallurgy Industry in Road Construction. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. Vol. 692. Pp. 776–782. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_82
11. Yliniemi J., Ramaswamy R., Luukkonen T., Laitinen O., de Sousa Á.N., Huuhtanen M., Illikainen M. Characterization of mineral wool waste chemical composition, organic resin content and fiber dimensions: Aspects for valorization. *Waste Manag.* 2021 Vol. 131. Pp 323–330. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.06.022
12. Yliniemi J., Laitinen O., Kinnunen P., Illikainen M. Pulverization of fibrous mineral wool waste. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 2018 Vol. 20. Pp. 1248–1256. DOI: 10.1007/s10163-017-0692-3
13. Nielsen E., Nørhede P., Ladefoged O., Tobiassen L., Evaluation of health hazards by exposure to Mineral wools (glass, stone/slag, HT) and proposal of a health-based quality criterion for ambient, Denmark, 2013. 30 p.
14. Kinnunen P., Yliniemi J., Talling B., Illikainen M. Rockwool waste in fly ash geopolymer composites. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2016. Vol. 19. No. 3. Pp. 1220–1227. DOI: 10.1007/s10163-016-0514-z
15. Davidovits J. *Geopolymer Chemistry and Applications*, 5th Ed. Publisher: Geopolymer Institute. 2020. 698 p.
17. Erofeev V.T., Rodin A.I., Yakunin V.V., Tuvvin M.N. Structure, composition and properties of geopolymers from mineral wool science [Struktura, sostav i svoystva geopolimerov iz otkhodov mineral'noy vaty] *waste Engineering and construction journal*. 2019. No. 6. Pp. 3–14. DOI: 10.18720/MCE.90.1 (rus)

Information about the author

Ageeva, Marina S., PhD, Assistant professor. E-mail: ageevams@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Fomina, Ecatherine V., PhD, Assistant professor. E-mail: fomina.katerina@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kikalishvili Diana G., Postgraduate student. E-mail: di_ki93@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Shapovalova, Anastasya V., Postgraduate student. E-mail: asasapov97@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 06.11.2024

Для цитирования:

Агеева М.С., Фомина Е.В., Кикалишвили Д.Г., Шаповалова А.В. Разработка щелочеактивированных вяжущих на основе базальтоволоконистых отходов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 28–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-28-36

For citation:

Ageeva M.S., Fomina E.V., Kikalishvili D.G., Shapovalova A.V. Development of alkali-activated binders based on basalt fiber waste. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 28–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-28-36