



## Wood Concrete Modified with Ground Granulated Blast Furnace Slag

Dvornikov, R.<sup>1\*</sup>; Velichko E.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

\* [ruslan\\_dvornikov94@mail.ru](mailto:ruslan_dvornikov94@mail.ru)

### Keywords:

Alkali-activated materials, composite material, ground granulated blast furnace slag, water glass, wood chip concrete, strength properties

### Abstract:

Increasing requirements for the physical and mechanical properties of building materials give impetus to the creation and improvement of new high-performance building materials, which include slag-silicate wood chip concrete. **The object of research** is high-performance wood chip concrete materials obtained using modified slag-silicate binders. On the first stage of the work, the physical and mechanical properties of fine-dispersed granulated blast furnace slag and wood chips were studied. **Methods:** The phase composition of the fine-dispersed granulated blast furnace slag was determined by x-ray phase analysis. Also, the microstructure of the sample of the ground granulated blast furnace slag was studied using electron microscopic analysis. **Results:** It was founded that that slag consists of a crystalline and amorphous phase. The content of its most active amorphous phase is on the level of 59.8%. The chemical composition for the ground slag sample was also done. As a result of that, the element composition of the ground slag was obtained. In particular, the slag basicity factor which value equals to 1.04, was defined. During the experiment, it was found that the slag mainly consists of large thickened irregular-shaped particles and their aggregates which diameters are from fractions of microns to several microns. At the same time, finer particles are subject to aggregation. On the second stage of the study, three experimental composition of slag-silicate wood chip concrete with different grouting fluid/slag ratio was developed. A water glass solution with a density equal to 1.31 g/cm<sup>3</sup> was used as a grouting fluid. As a result of the study, the composite material with an average density of 730 kg/m<sup>3</sup>, and the strength in 1.92 MPa was obtained. The dependence of the strength changing of slags-silicate wood chip concrete on the ratio of the grouting fluid/binder and the functional relationship of its strength and density were determinate. Based on the results of the experiments, it was founded that the optimal physical and mechanical properties of the slag-silicate wood chip concrete are achieved for the composition with the grouting fluid slag ratio equal to 0.52.

## 1 Introduction

В 2010-х годах бесклнкерные гидравлические вяжущие вещества рассматриваются в качестве эффективных материалов для замещения портландцемента в производстве строительных конструкций различного назначения.

Портландцемент является одним из самых широко используемых материалов в строительстве. Производство портландцемента является стратегической отраслью для любой страны. Изготовлением цемента занимаются 149 стран, из которых 17 не имеют собственной сырьевой базы. Мощность заводов по выпуску цемента составляет около 3,5 млрд. т. в год. Производство портландцемента связано с высокими затратами энергетических и природных ресурсов, а также загрязнением окружающей среды. В частности, выбросы углекислого газа в атмосферу от изготовления цемента, по разным источникам, достигают от 7% до 10% всего объема поступающего в атмосферу углекислого газа в год, что оказывает значимое влияние на окружающую среду [1]–[4].

Еще одним видом материала, который широко применяется в строительстве вследствие своих уникальных свойств, является древесина. В Российской Федерации конструкции из

древесины получили большую популярность, в основном, из-за больших лесных запасов, основная часть которых расположена в восточных районах страны. Всевозрастающие масштабы вырубки и производства древесины являются причиной накопления большого количества отходов, в их числе горбыль, древесные опилки, стружка и т.п., оказывают негативное влияние на окружающую среду в районах действия таких предприятий.

Утилизацию отходов древесины в Российской Федерации начали исследовать уже с начала 30-х годов. Одним из хорошо известных материалов на основе отходов деревообрабатывающей промышленности и портландцемента является арболит. Формирование микроструктуры и свойств арболита, а также эффективные технологии производства арболита достаточно хорошо изучены [5]–[9].

Еще одним широко распространенным отходом является доменный гранулированный шлак. Доменный гранулированный шлак достаточно хорошо изучен. Утилизации и эффективному использованию гранулированного шлака посвящено большое количество исследований. Одним из направлений применения доменного гранулированного шлака в строительстве является производство вяжущих веществ. Шлак является основным компонентом шлакосиликатных вяжущих и изделий на их основе. Широко применяются шлаки и в качестве добавки в цементы. Химический состав шлаков функционально связан с видом руды, использованной для его изготовления, качеством кокса, флюса и видом производимого чугуна. Гидравлической активностью обладают гранулированные шлаки быстрого охлаждения, т.е. остеклованные. Так называемые шлаковые пески или шлаки медленного охлаждения обладают существенно меньшей гидравлической активностью, чем доменный гранулированный шлак, вследствие значимо большего содержания кристаллической фазы. Установлено, что лучшие вяжущие свойства проявляют шлаки с дисперсностью 3200-5000 см<sup>2</sup>/г [10]. Шлакосиликатные вяжущие получают в результате затворения тонкомолотого доменного гранулированного шлака и щелочного активатора. Наиболее эффективными щелочными активаторами являются следующие растворы: сода кальцинированная, жидкого стекла, метасиликат натрия, едкий натр, содощелочной плав [11].

Начало исследованиям вяжущих щелочной активации положил Пьюрдон в своем исследовании по влиянию растворов гидроксида натрия на техногенные алюмосиликатные материалы различного состава и морфологии [12]. Шлакосиликатные вяжущие и бетоны, приготовленные с их использованием, известны с 60-х годов прошлого столетия. В 2010-х годах в Пензенском государственном университете архитектуры и строительства (Пенза, Российская Федерация) под руководством В.И. Калашникова проводились исследования шлакосиликатных вяжущих веществ [13], [14]. В Казанском государственном архитектурно-строительном университете (Казань, Российская Федерация) под руководством Р.З. Рахимова и Н.Р. Рахимовой исследуются композиционные шлакосиликатные вяжущие [15], [16].

Разработка шлакосиликатных вяжущих веществ за рубежом также получила широкое распространение. Работы, выполненные в формате данного направления, были проведены французским ученым Дж. Давидовичем в 1970-х гг. прошедшего столетия [17]–[19]. Помимо этого, схожие составы вяжущих были запатентованы в ряде других государств: в США, Великобритании, Китае, а также в РФ [20]–[26].

Однако, проблема производства композиционных материалов на основе техногенных отходов промышленных предприятий, а именно доменных гранулированных шлаков и отходов деревообрабатывающей промышленности с оптимальными параметрами, обеспечивающими получение их с максимальными строительно-техническими свойствами, до настоящего времени с использованием системных методов исследований не изучалась. В этой связи исследование и разработка высокоэффективных арболитовых материалов, полученных применением модифицированных шлакосиликатных вяжущих веществ, становится перспективным направлением по расширению и массовому вовлечению в процесс производства строительной продукции техногенных отходов металлургической и деревоперерабатывающей отраслей промышленности.

Объектом исследования настоящей работы являются арболитовые материалы, полученные применением модифицированных шлакосиликатных вяжущих веществ.

Предметом исследования является дисперсный состав тонкомолотого шлака, плотность и модуль основности раствора жидкого стекла и другие параметры компонентов шлакосиликатных вяжущих.

Целью данной работы является разработка состава конструкционного арболита с маркой по средней плотности D600-D700 и прочностью не менее 1,9 МПа на основе тонкомолотого доменного гранулированного шлака, щепы из хвойных пород древесины и раствора модифицированного жидкого стекла плотностью 1,31 г/см<sup>3</sup> в качестве затворителя.

## 2 Materials and Methods

Доменный гранулированный шлак это основной компонент, который использовался в качестве вяжущего вещества для производства арболита. Доменный гранулированный шлак был предоставлен компанией ПАО «Мечел», Москва, Российская Федерация. Образцы доменного гранулированного шлака были исследованы с использованием рентгенофазового, электронно-микроскопического и химического анализов. Также на основании ГОСТ 3476-74 «Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цементов» (Russian State Standard GOST 3476-74 "Slags blast-furnace and electric-phosphoric granulated for manufacturing of cement") и ТУ 0799-001-99126491-2013 «Шлак доменный гранулированный молотый» (Technical Specification TU 0799-001-99126491-2013 "Granulated ground blast furnace slag") были определены основные физические свойства шлака (Табл. 1).

Рентгенофазовый анализ шлака проводился на дифрактометре «D8 Advance» (Bruker AXS, Германия) при следующих условиях исследования: рентгеновская трубка – медная (CuK $\alpha$ -излучение) с никелевым фильтром. Напряжение рентгеновской трубки составляет 40 кВ, ток – 40 мА, воздействие – 1.1 час, диаметр образца – 10 мм; скорость вращения гониометра – 4 град./мин; постоянная времени – 1,0 сек; скорость отсчета импульсов – 1·10<sup>4</sup> имп./с.

Электронно-микроскопический анализ выполнялся с использованием растрового электронного микроскопа «FEI Quanta 200», со следующими характеристиками: ускоряющее напряжение 100 В – 30 кВ; максимальное увеличение – до 100000 крат; сверхвысокое разрешение – до 1 нм (при 20 кВ и рабочем расстоянии 2 мм); разрешение EDX детектора – 129 эВ на линии Ka(Mn), скорость счета до 100000 имп./с.

Химический анализ проведен посредством рентгенофлуоресцентного волнодисперсионного спектрометра «ARL OPTIM`X 200W» со следующими характеристиками: анализируемые элементы: F – U; мощность рентгеновской трубки – 0,2 кВт; напряжение питания – 230 В; относительное СКО выходного сигнала не более 1,0%. Химический состав образца шлака представлен в Табл. 2.

Состав арболита подбирался расчетно-экспериментальным способом, основываясь на данных, представленных в ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него» (Russian State Standard GOST 19222-2019 "Arbolit and its products. Specifications"). Составы арболита представлены в Табл. 3.

Для проведения испытания были изготовлены три серии тестовых образцов с различным соотношением затворитель/шлак: S1, S2, S3 (табл. 3). Каждая серия состояла из трех образцов размером 40x40x160мм. Образцы были изготовлены в лабораторных условиях при комнатной температуре и естественной относительной влажности воздуха. Замесы производились вручную с использованием стандартной чаши и лопатки для перемешивания цементного теста в соответствии с ГОСТ 310.3-76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема» (Russian State Standard GOST 310.3-76 "Cements. Methods for determination of standard consistency, times of setting and soundness"). Укладка арболитобетонной смеси в формы осуществлялась в два слоя с уплотнением каждого из слоев методом штыкования. Распалубка образцов производилась через 24 часа с момента укладки арболитобетонной смеси в формы. Хранение образцов-балочек производилось в лабораторных условиях при комнатной температуре и относительной влажности воздуха не менее 90%. Испытания на прочность при изгибе проводились на прессе «FORM+TEST prüfsystemePOB1154 D-88491» в возрасте 28 суток в соответствии с требованиями ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него» (Russian State Standard GOST 19222-2019 "Arbolit and its products. Specifications") и ГОСТ 310.4-81. «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии» (Russian State Standard GOST 310.4-81 "Cements. Methods of bending and compression strength determination")

Эксперименты проводились в лаборатории кафедры строительных материалов и материаловедения национального исследовательского Московского государственного

строительного университета Москва, Российская Федерация (Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russian Federation).

### 3 Results and Discussion

#### 3.1 The results of the raw materials properties determining

Результаты рентгенофазового анализа показали, что доменный гранулированный шлак состоит из аморфной и кристаллической фаз. Содержание рентгеноаморфной фазы составляет 59.8%. Кристаллическая фаза состоит из минералов в количестве:  $\text{CaCO}_3$  39,69%; мелилит ( $\text{Al}_{0.4}\text{Ca}_{1.7}\text{K}_{0.1}\text{Mg}_{0.5}\text{Na}_{0.2}\text{O}_7\text{Si}_2$ ) 22,46%; алит ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) 18,10%; герцинит ( $\text{Al}_{1.999}\text{Fe}_{0.111}\text{Mg}_{0.89}\text{O}_4$ ) 11,64% и ангидрит ( $\text{CaSO}_4$ ) 8,11%. На Рис.1, представлены результаты рентгенофазового анализа доменного гранулированного шлака.

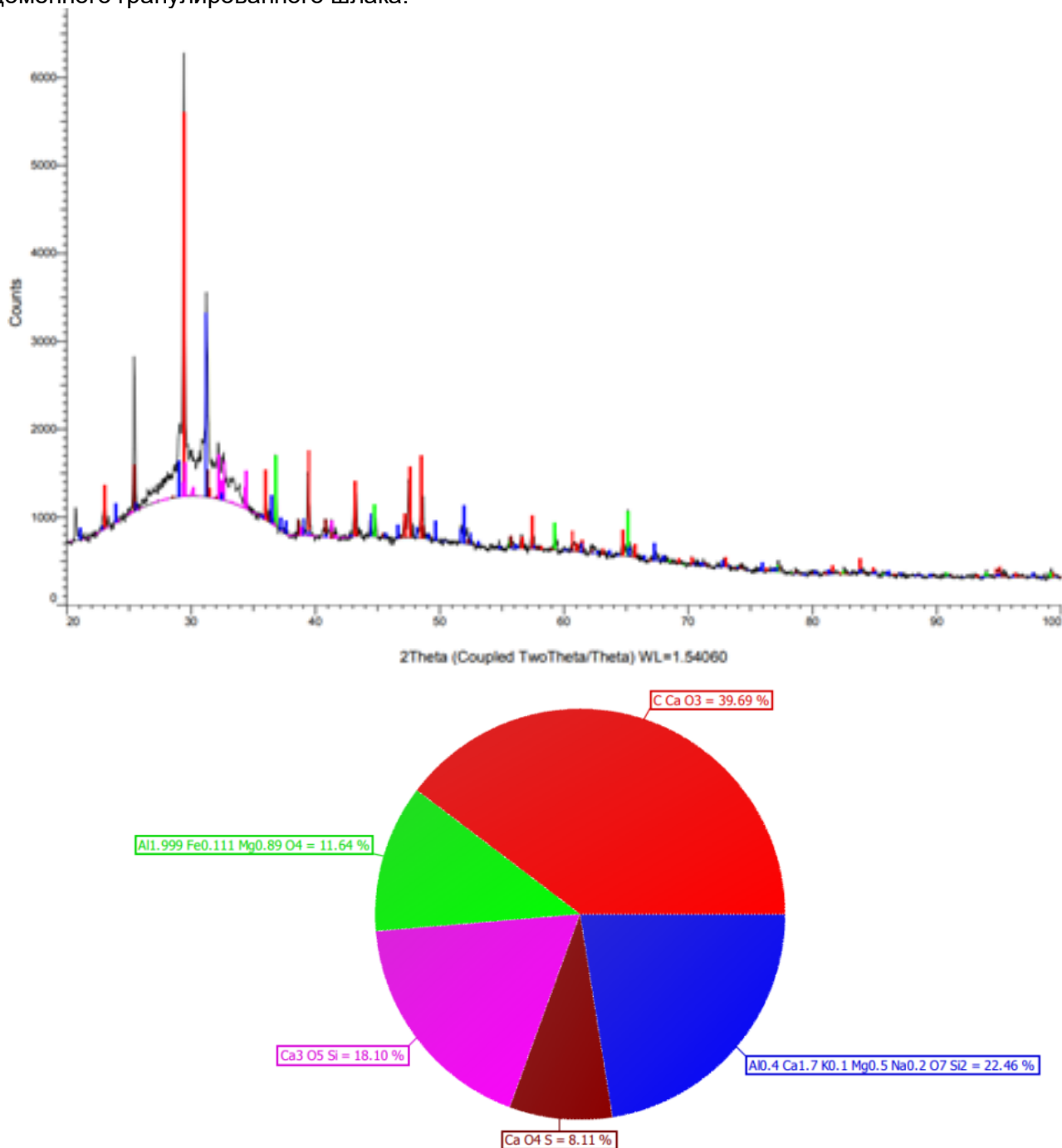
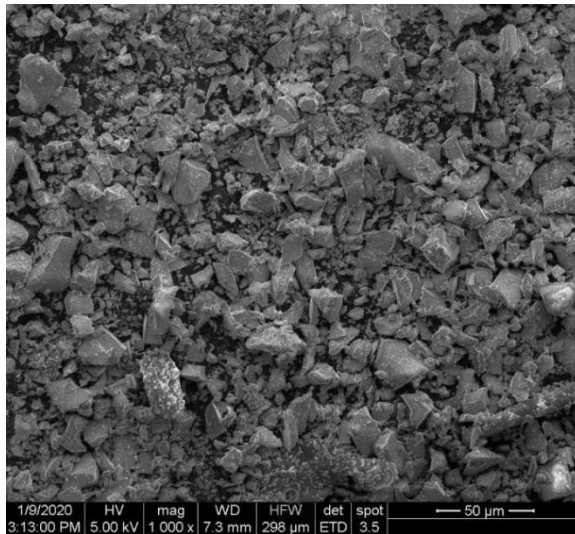
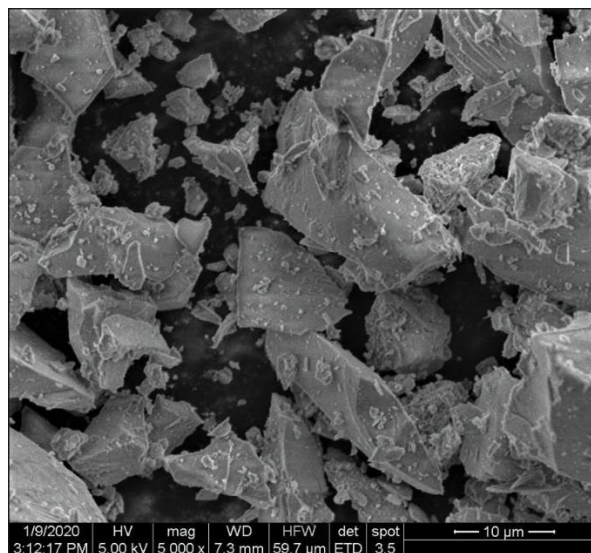


Рис. 1 - Результаты рентгенофазового анализа доменного гранулированного шлака  
Fig. 1 - The results of x-ray phase analysis of the ground granulated blast-furnace slag

В результате растровой электронной микроскопии образца шлака было установлено, что материал состоит, в основном, из крупных утолщенных частиц неправильной формы и их агрегатов, диаметры которых от долей мкм до нескольких мкм. При этом агрегации подвержены более тонкодисперсные частицы. Фотоснимки, полученные с помощью растрового электронного микроскопа при увеличении  $\times 1000$  и  $\times 5000$ , представлены, соответственно на Рис. 2 и 3.



**Рис. 2 - Электронная микроскопия образца молотого шлака ( $\times 1000$ )**  
**Fig. 2 - The scanning electron microscope analysis of the ground slag ( $\times 1000$ )**



**Рис. 3 - Электронная микроскопия образца молотого шлака ( $\times 5000$ )**  
**Fig. 3 - The scanning electron microscope analysis of the ground slag ( $\times 5000$ )**

Результаты определения физических свойств молотого шлака представлены в Табл.1.

**Таблица 1. Физические свойства молотого шлака**  
**Table 1. The physical properties of the ground slag**

Наименование материала	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Влажность, %	Проход через сито №0045, %	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	Модуль основности
Молотый шлак	1880	2940	0,5-1,5	99,9%	517	1,04

Результаты химического анализа образца молотого шлака представлены в Табл.2.

**Таблица 2. Химический состав молотого шлака**  
**Table 2. The chemical composition of the ground slag**

CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	п.п.п
33,07	32,62	13,1	11,7	5,41	1,9	0,702	0,529	0,5	0,469

В качестве затворителя был использован раствор модифицированного жидкого стекла ООО «ПРОМСТЕКЛОЦЕНТР», Екатеринбург, Российская Федерация, со следующими характеристиками: плотность 1,31г/см<sup>2</sup>; массовая доля SiO<sub>2</sub> 19,95%; массовая доля Na<sub>2</sub>O 10,35%.

Для производства арболита использовалась древесная щепа хвойных пород в соответствии с ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него» (Russian State Standard GOST 19222-2019 "Arbolit and its products. Specifications") со следующими характеристиками: насыпная плотность – 120кг/м<sup>3</sup>. Влажность – 12%. Водопоглощение древесины по массе  $W_m$  – 165%.

### 3.2 The compositions of the slag-silicate wood chip concrete

Соотношения исходных компонентов для проведения экспериментальных исследований, полученных в результате подбора состава арболита представлены в табл. 3.

**Таблица 3. Составы шлакосиликатного арболита**  
**Table 3. The compositions of the slag-silicate wood chip concrete**

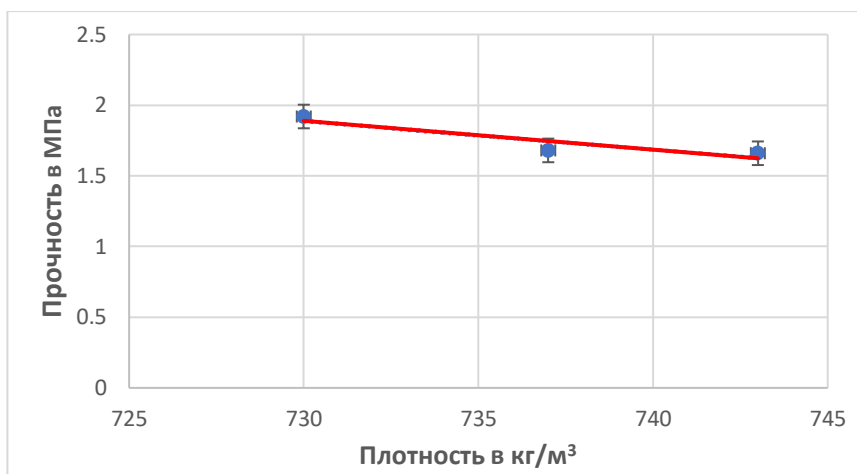
Наименование замеса	Расход шлака, кг/м <sup>3</sup>	Расход щепы, кг/м <sup>3</sup>	Расход жидкого стекла, кг/м <sup>3</sup>	Затворитель/Шлак
S1	360	168	210	0,58
S2	360	168	231	0,64
S3	360	168	189	0,52

#### 3.2. The results of the experiments

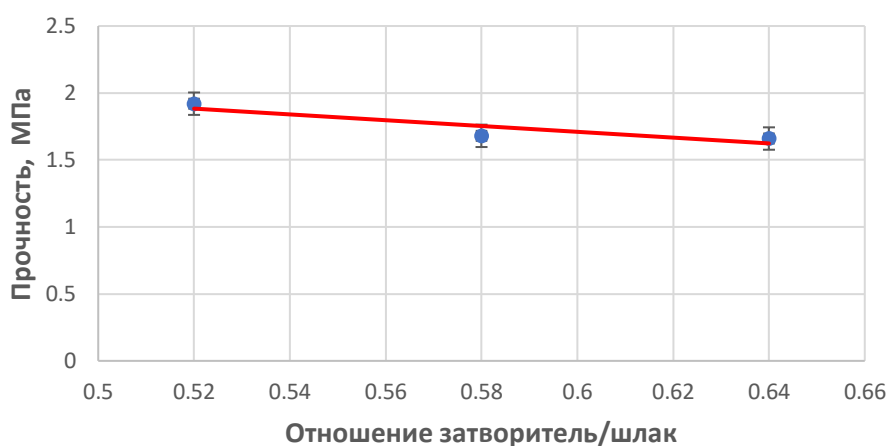
В результате исследований были определены основные физико-механические показатели арболита: плотность и прочность на изгиб в возрасте 28 суток (табл. 4, рис. 4, рис. 5).

**Таблица 4. Основные физико-механические показатели шлакосиликатного арболита**  
**Table 4. The main physical and mechanical properties of the slag-silicate wood chip concrete**

Наименование замеса	Расход шлака, кг/м <sup>3</sup>	Расход щепы, кг/м <sup>3</sup>	Расход жидкого стекла, кг/м <sup>3</sup>	Затворитель/Шлак	Плотность образцов, кг/м <sup>3</sup>		Влажность, %	R <sub>изг</sub> , МПа
					Состояние			
					Сухое	Естественное		
S1	360	168	210	0,58	609	737	21,1	1,68
S2	360	168	231	0,64	612	743	21,5	1,66
S3	360	168	189	0,52	605	730	20,7	1,92



**Рис. 4 - Зависимость прочности полученного композита от его плотности**  
**Fig. 4 - The strength dependence of the developed composite from its density**



**Рис. 5 - Зависимость прочности полученного композита от отношения затворитель/шлак**  
**Fig. 5 - The strength dependence of the developed composite from the grouting fluid/slag ratio**

Полученные результаты свидетельствуют, что плотность композита и отношение затворитель/шлак оказывают значимое влияние на прочностные характеристики материала. В частности, прочность композита увеличивается (до 0,26 МПа) с уменьшением его плотности и содержания раствора жидкого стекла (рис. 4 и 5). Снижение прочности исследуемых композитов при увеличении количества жидкого стекла может быть связано с увеличением пористости материала. Наиболее высокие показатели прочности (1,92 МПа) наблюдается при соотношении затворитель/шлак 0,52. Дальнейшее уменьшение содержания жидкого стекла в составе арболита приводит к нарушению удобоукладываемости смеси и ее недоуплотнению.

## 4 Conclusions

1. Доменный гранулированный шлак полусухого способа грануляции, содержащий 59,8% и более аморфной фазы с дисперсностью 450 – 500 м<sup>2</sup>/кг, а также модифицированное жидкое стекло плотностью 1,31 г/см<sup>3</sup> и щепа хвойных пород древесины являются эффективными компонентами для производства арболита высокого качества;
2. Определены основные физико-механические показатели полученного композита. Плотность полученного композита находилась на уровне 730 кг/м<sup>3</sup>, прочность на изгиб 1.92 МПа;
3. Прочность композита увеличивается (до 0,26 МПа) с уменьшением его плотности и содержания раствора жидкого стекла, а оптимальные физико-механические показатели шлакосиликатного арболита достигаются при соотношении затворитель/вяжущее равном 0,52.

## 5 Acknowledgements

Авторы выражают благодарность научно-исследовательскому институту строительных материалов и технологий научно-исследовательского Московского государственного строительного университета, за проведение рентгенофазового, электронно-микроскопического и химического анализов образцов доменного гранулированного шлака.

Авторы благодарят ПАО «Мечел», Москва, Российская Федерация и ООО «ПРОМСТЕКЛОЦЕНТР», Екатеринбург, Российская Федерация за предоставленные материалы для проведения исследований.

Особую благодарность авторы выражают главному редактору журнала Строительство уникальных зданий и сооружений Николаю Ивановичу Ватину за очень ценную и кропотливую помощь при подготовке рукописи статьи к изданию.

### References

1. Miller, S.A., John, V.M., Pacca, S.A., Horvath, A. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050 (2018) *Cement and Concrete Research*, 114, pp. 115–124. DOI:10.1016/j.cemconres.2017.08.026.
2. Scrivener, K.L., John, V.M., Gartner, E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry (2018) *Cement and Concrete Research*, 114, pp. 2–26. DOI:10.1016/j.cemconres.2018.03.015.
3. Singh Gaharwar, A., Gaurav, N., AP, S., Hira, S., Gariya, Bhoora. A Review Article on Manufacturing Process of Cement, Environmental Attributes, Topography and Climatological Data Station: IMD, Sidhi M.P (2016) *Journal of Medicinal Plants Studie*, 4(4), pp. 47–53.
4. Syamala Devi, K., Vijayalakshmi, V., Alakanandana, A. Impacts of Cement Industry on Environment - An Overview (2017) *Asia Pacific Journal of Research*, 1(57), pp. 156–161.
5. Coatanlem, P., Jauberthie, R., Rendell, F. Lightweight wood chipping concrete durability (2006) *Construction and Building Materials*, 20(9), pp. 776–781. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2005.01.057.
6. Berzins, A., Morozovs, A., Gross, U., Iejavs, J. Mechanical properties of wood-geopolymer composite (2017) *Engineering for Rural Development*, 16(May), pp. 1167–1173. DOI:10.22616/ERDev2017.16.N251.
7. Xu, R., He, T., Da, Y., Liu, Y., Li, J., Chen, C. Utilizing wood fiber produced with wood waste to reinforce autoclaved aerated concrete (2019) *Construction and Building Materials*, 208, pp. 242–249. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.030.
8. Pavlíková, M., Zemanová, L., Pokorný, J., Záleská, M., Jankovský, O., Lojka, M., Sedmidubský, D., Pavlík, Z. Valorization of wood chips ash as an eco-friendly mineral admixture in mortar mix design (2018) *Waste Management*, 80, pp. 89–100. DOI:10.1016/j.wasman.2018.09.004.
9. Sarmin, S.N., Welling, J., Krause, A., Shalbafan, A. Investigating the possibility of geopolymer to produce inorganic-bonded wood composites for multifunctional construction material - A review (2014) *BioResources*, 9(4), pp. 7941–7950. DOI:10.15376/biores.9.4.7941-7950.
10. Humad, A.M., Habermehl-Cwirzen, K., Cwirzen, A. Effects of Fineness and Chemical Composition of Blast Furnace Slag on Properties of Alkali-Activated Binder (2019) *Materials*, 12(20), pp. 3447. DOI:10.3390/ma12203447.
11. Gao, X. Alkali activated slag-fly ash binders: design, modeling and application (2017) Technische Universiteit Eindhoven. Eindhoven, 253 p.
12. Purdon, A.O. The action of alkalis on blast-furnace slag (1940) *Journal of the Society of Chemical Industry*, 59(9), pp. 191–202.
13. Kalashnikov, V.I., Moroz, M.N., Sadenko, S.M., Belykova, E.A., Moskvina, R.N., Belykova, V.S. Effective clay-slag building materials using clay South-Bashmakovo field (2015) *Modern technics and technologies*, 42(2), pp. 12–16.
14. Kalashnikov, V.I., Moroz, M.N. High hydrophobic multicomponent low-slag fine-grained concretes. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering* (2010) *Construction and Architecture*, 1(17), pp. 106–111.
15. Rakhimova, N.R., Rakhimov, R.Z. Reaction products, structure and properties of alkali-activated metakaolin cements incorporated with supplementary materials – A review (2019) *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), pp. 1522–1531. DOI:10.1016/j.jmrt.2018.07.006.
16. Rakhimova, N.R., Rakhimov, R.Z., Morozov, V.P., Potapova, L.I., Osin, Y.N. Mechanism of



- solidification of simulated borate liquid wastes with sodium silicate activated slag cements (2017) *Journal of Cleaner Production*, 149, pp. 60–69. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.02.066.
17. Davidovits, J. Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials (1991) *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37, pp. 1633–1656. DOI:10.1007/BF01912193.
  18. Davidovits, J. Geopolymer Chemistry and Applications (2020) Institut Géopolymère, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, 680 p.
  19. Izquierdo, M., Querol, X., Davidovits, J., Antenucci, D., Nugteren, H., Fernández-Pereira, C. Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching (2009) *Journal of Hazardous Materials*, 166(1), pp. 561–566. DOI:10.1016/j.jhazmat.2008.11.063.
  20. Song, K.-I., Song, J.-K., Lee, B.Y., Yang, K.-H. Carbonation Characteristics of Alkali-Activated Blast-Furnace Slag Mortar (2014) *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, pp. 1–11. DOI:10.1155/2014/326458.
  21. Nedeljković, M., Li, Z., Ye, G. Setting, Strength, and Autogenous Shrinkage of Alkali-Activated Fly Ash and Slag Pastes: Effect of Slag Content (2018) *Materials*, 11(11), pp. 2121. DOI:10.3390/ma11112121.
  22. Bostanci, L., Sola, O.C. Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Aerogel-Incorporated Alkali-Activated Slag Mortars (2018) *Advances in Civil Engineering*, 2018, pp. 1–9. DOI:10.1155/2018/4156248.
  23. Thomas, R., Ye, H., Radlińska, A., Peethamparan, S. Alkali-Activated Slag Cement Concrete: A closer look at a sustainable alternative to portland cement (2016) *Concrete International*, 38(1), pp. 33–38.
  24. Kharchenko, A.I., Alekseev, V.A., Kharchenko, I.Y., Alekseev, A.A. Application of slag-alkali binders in jet cement grouting for soil consolidation (2019) *Vestnik MGSU*, (6), pp. 680–689. DOI:10.22227/1997-0935.2019.6.680-689.
  25. Erofeev, V.T., Rodin, A.I., Yakunin, V. V., Bogatov, A.D., Bochkin, V.S., Chegodajkin, A.M. Alkali-activated slag binders from rock-wool production wastes (2018) *Magazine of Civil Engineering* 82(6), pp. 219–227. DOI:10.18720/MCE.82.20.
  26. Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., Illikainen, M. Comparison of alkali and silica sources in one-part alkali-activated blast furnace slag mortar (2018) *Journal of Cleaner Production*, 87, pp. 171–179. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.03.202.