



УДК 658.567.1
DOI 10.17073/0368-0797-2025-2-131-138



Оригинальная статья
Original article

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА

Г. А. Ульева^{1,2}, К. Туысхан², Е. М. Мацугина²,
И. Е. Волокитина² , Г. Е. Ахметова²

¹ АО «Qarmet» (Республика Казахстан, 101400, Карагандинская обл., Темиртау, пр. Республики, 1)

² Карагандинский государственный индустриальный университет (Республика Казахстан, 101400, Карагандинская обл., Темиртау, пр. Республики, 30)

 irinka.vav@mail.ru

Аннотация. Для многих стран проблема утилизации отходов производства и быта стоит особенно остро, поскольку ежегодное накопление всех видов отходов достаточно велико (около 7 млрд т), а их повторное использование не превышает 30 %. При этом отходы производства отрицательно влияют на живые организмы и окружающую среду, поэтому необходимо расширение их переработки. В данной работе рассмотрены проблемы утилизации, переработки (рециклинга) промышленных и бытовых отходов и перспективы их применения в различных отраслях. Рассмотрено влияние различных рецептур исходных компонентов (микрокремнезем, доменный шлак, гашеной извести) и их фракций на физико-механические свойства полученных новых композиционных материалов. Проведены исследования полученных материалов с целью определения значений предела прочности на сжатие и процент водопоглощения. Так, все образцы имеют низкий процент водопоглощения (0 – 13,12 %), кроме образца 7 (41,34 %), состоящего из двух частей микрокремнезема, одной части шлака и одной части извести. Выявлено, что в образцах, в состав которых входит микрокремнезем, наблюдаются высокие значения предела прочности на сжатие. Образцы 3 и 4, состоящие из микрокремнезема и шлака, обладают самым низким пределом прочности – 14,74 и 17,18 кгс/см² соответственно. Однако образец 8, в состав которого одновременно входят две части микрокремнезема, шлак и известь, характеризуется самым высоким значением предела прочности на сжатие – 51,16 кгс/см². Таким образом, микрокремнезем оказывает большее влияние на увеличение прочностных свойств. При этом применение отходов производства при создании новых вторичных материалов приводит к снижению себестоимости продукции, расширению сырьевой базы страны, а также снижению экологической нагрузки региона.

Ключевые слова: отходы производства, промышленные отходы, бытовые отходы, отходы кремниевых производств, микрокремнезем, кирпичный лом, зола, доменный шлак, защита окружающей среды

Для цитирования: Ульева Г.А., Туысхан К., Мацугина Е.М., Волокитина И.Е., Ахметова Г.Е. Современное состояние проблемы утилизации отходов производства. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(2):131–138. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-2-131-138>

ACTUAL PROGRESS OF PRODUCTION WASTE DISPOSAL PROBLEMS

G. A. Ulyeva^{1,2}, K. Tuyskhan², E. M. Matsugina²,
I. E. Volokitina² , G. E. Akhmetova²

¹ JSC “Qarmet” (1 Respubliki Ave., Timertau, Karaganda Region 101400, Republic of Kazakhstan)

² Karaganda State Industrial University (30 Respubliki Ave., Timertau, Karaganda Region 101400, Republic of Kazakhstan)

 irinka.vav@mail.ru

Abstract. For many countries the problem of industrial and household waste disposal is particularly acute, since the annual accumulation of all types of waste is quite large (about 7 billion tons), and their reuse does not exceed 30 %. At the same time, industrial waste has a negative impact on living organisms and the environment. Therefore, ways of recycling household and production wastes are necessary. This article considers the problems of utilization, processing (recycling) of industrial and household waste and the prospects of their application in various industries. The influence of different formulations of initial components (microsilica, blast furnace slag, slaked lime), their fractions on physical and mechanical properties of the obtained new composite materials is considered. The obtained materials were investigated in order to determine the values of compressive strength and percentage of water absorption. Thus, all samples have low water absorption percentage (0 – 13.12 %), except for Sample 7

(41.34 %), consisting of 2 parts of microsilica, 1 part of slag and 1 part of lime. It was found that high values of compressive strength are observed in the samples which include microsilica. Samples 3 and 4, composed of microsilica and slag jointly, have the lowest compressive strength of 14.74 and 17.18 kgf/cm², respectively. However, Sample 8, which is composed of 2 parts of microsilica, slag and lime simultaneously, is characterized by the highest compressive strength value of 51.16 kgf/cm². Microsilica has a greater influence on the increase of strength properties. At the same time, the use of industrial waste in the creation of new secondary materials leads to a reduction in the cost of production, expansion of the raw material base of the country, as well as reducing the environmental load of the region.

Keywords: industrial waste, production waste, domestic waste, silicon production waste, microsilica, brick scrap, ash, blast furnace slag, environmental protection

For citation: Ulyeva G.A., Tuyskhan K., Matsugina E.M., Volokitina I.E., Akhmetova G.E. Actual progress of production waste disposal problems. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(2):131–138. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-2-131-138>

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы такие отрасли промышленности, как металлургия, машиностроение и материаловедение продолжают активно развиваться [1–4], однако проблема твердых отходов, особенно бытовых, до сих пор не решена ни в одной стране мира^{1, 2}. В странах СНГ эта проблема стоит особенно остро, так как ежегодный объем всех видов отходов составляет около 7 млрд т, но перерабатывается и повторно используется не более 30 % от их общего объема. Главная особенность этих отходов состоит в их непосредственном влиянии на жизнь людей, так как они накапливаются прямо в населенных пунктах, жилых и рекреационных зонах. Отходы необходимо либо включать в естественные природные процессы, либо перерабатывать и утилизировать. Наиболее рациональный путь решения этой проблемы состоит в освоении технологий переработки отходов и развитии новой отрасли промышленности [5–8]. Однако на этом пути существует множество сложных задач, которые, несмотря на их трудоемкость, все же возможно решить [9].

В настоящее время объем промышленных отходов в Казахстане составляет 31,6 млрд т. В последние годы этот показатель ежегодно увеличивается на 1 млн т³.

Однако, согласно докладу «О состоянии окружающей среды и об использовании природных ресурсов Республики Казахстан за 2022 г.», объем промышленных отходов превышает 895 млн т. Лидерами по накоплению этих отходов являются Костанайская,

Павлодарская и Карагандинская области, в которых перерабатывается примерно половина отходов. Однако такие регионы, как Туркестанская (0,76 %), Алматинская (9,32 %) и Жамбылская (7,38 %) области, демонстрируют низкие показатели рециклинга. В 2022 г. доля переработанных и утилизированных промышленных отходов достигла 40,03 %, что превысило показатель предыдущего года (38,2 % в 2021 г.)⁴.

Вынужденное накопление огромных объемов отходов и их захоронение на свалках наносят ощутимый ущерб национальной экономике страны из-за упущенных возможностей по использованию вторичного сырья. При этом образование промышленных отходов приводит к убыткам, исчисляемым десятками миллионов долларов США [10–12]. Вторая, не менее важная сторона проблемы – это негативное воздействие промышленных отходов на окружающую среду, проявляющееся, в частности, в катастрофическом загрязнении атмосферы промышленными выбросами² [12].

Ученые как в нашей стране, так и за рубежом ведут исследования в области утилизации промышленных и бытовых отходов [13–15]. Так, разработан метод переработки пылевидных отходов кремния путем их переплава в среде твердожидкого алюминия [13; 16], который позволяет использовать измельченные кремниевые отходы при выплавке алюминиевого сплава. Однако данный метод не подходит для переработки других порошкообразных кремнийсодержащих отходов.

Известно, что для производства алюминийно-кремниевых сплавов используется кристаллический кремний фракции 20–50 мм, тогда как пылевидные и мелкие фракции, образующиеся после дробления и отсева, направляются в отходы и не используются при производстве указанных сплавов. В работах [17–19] предложен метод переработки отходов кремния с помощью их введения в алюминиевый расплав при перемешивании. Особенностью этого метода является подача кремниевой фракции размером 0,1–20,0 мм на поверхность расплава при температуре 670–680 °С с последующим нагревом до 720–750 °С со скоростью 2,5–4,0 °С/мм. Это позволяет повысить степень усвоения кремния и снизить потери металла вследствие окисления расплава за счет сокращения продолжительности плавления.

Для получения высококачественного технического кремния казахские технологи и ученые разрабатывают

¹ Совершенствование законодательства с целью повышения эффективности переработки и использования отходов производства и потребления. URL: <https://council.gov.ru/activity/activities/roundtables/29479> (дата обращения: 06.03.2025).

² Проблема промышленных отходов. URL: <https://msd.com.ua/tehnologiya-teploizolyacii/programma-promyshlennykh-otxodov> (дата обращения: 06.03.2025).

³ Национальный доклад о состоянии окружающей среды и об использовании природных ресурсов Республики Казахстан за 2021 год. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo/documents/details/383692?lang=ru> (дата обращения: 06.03.2025).

⁴ На обсуждение проект Национального доклада о состоянии окружающей среды и об использовании природных ресурсов Республики Казахстан за 2022 год. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo/documents/details/144658?lang=ru> (дата обращения: 26.09.2024).

методы переработки улавливаемой пыли, которые позволят не только снизить себестоимость производства, но и уменьшить нагрузку на окружающую среду за счет сокращения промышленных выбросов. Также ведется разработка технологий переработки микросилики для получения брикетированной моношихты.

В работе [20] представлена технология получения кремнеземного наполнителя, предназначенного для использования в производстве резиновых композиций на Карагандинском резинотехническом заводе, а также в других отраслях промышленности.

Существующие технологии утилизации порошкообразных кремнийсодержащих отходов, несмотря на их разнообразие, имеют одну общую особенность, которая состоит в том, что даже после переработки кремний в составе кремнийсодержащих отходов сохраняет свое химическое состояние и остается неизменным [21; 22].

Таким образом, в данной статье авторы, опираясь на проведенный обзор литературы, рассматривают технологию переработки промышленных и бытовых отходов, в том числе микросилики, для получения вторичных композиционных материалов [23].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходные компоненты были взяты в соотношениях 1:1 (образцы 1, 3, 5), 2:1 (образцы 2, 4, 6), 1:1:1 (образец 7) и 2:1:1 (образец 8). В табл. 1 представлен состав полученных образцов.

Все материалы просеивали через сито с размером фракции 1 – 2 мм, после чего взвешивали. Затем исходные компоненты объединяли в сухом виде и тщательно перемешивали до достижения равномерного распределения всех компонентов. После этого в смесь постепенно добавляли 5 – 7 г воды, продолжая перемешивать до получения однородной массы. Полученную массу помещали в формы, встряхивали и уплотняли. Полное высыхание форм занимало 14 сут. (рис. 1). После сушки образцы извлекали, проверяли их целостность и взвешивали. При этом все высушенные образцы при постукивании издавали металлический звук.

Исследование физико-механических свойств полученных вторичных материалов проводилось в три этапа:

Таблица 1. Соотношение исходных компонентов

Table 1. Ratio of initial components

Материал	Масса материала в образце, г							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Микросилика	25	50	25	50	–	–	25	50
Известь	25	25	–	–	25	25	25	25
Шлак	–	–	25	25	25	50	25	25

- первый этап – исследование водопоглощения образцов без покрытия;
- второй этап – исследование водопоглощения образцов с покрытием;
- третий этап – испытание образцов на сжатие.

После этого образцы испытывались на водопоглощение в соответствии с ГОСТ 12730.3–2020, для чего их полностью погружали в воду. В процессе насыщения водой выделялись пузырьки, что может свиде-

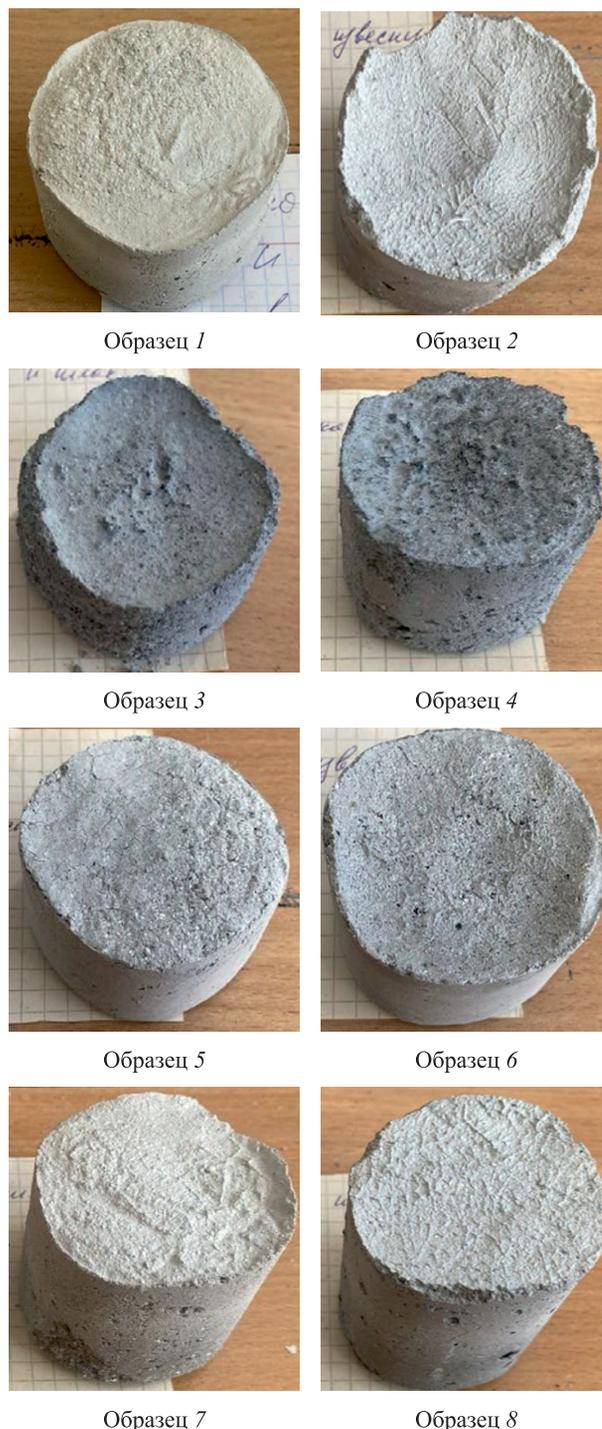


Рис. 1. Полученные образцы после высыхания

Fig. 1. Samples obtained after drying

тельствовать о наличии в образцах внутренних пор. Образцы выдерживали в воде до полного прекращения выделения пузырьков, затем их взвешивали. После этого образцы загружали в печь типа SNOL, нагретую

до 150 – 200 °С. Образцы высушивали до достижения постоянной массы и взвешивали повторно.

Расчет процента водопоглощения W_m образцов производится по формуле (ГОСТ 12730.3–2020)

$$W_m = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100 \%,$$

где m_d – масса высушенного образца, г; m_w – масса водонасыщенного образца, г.

Для снижения водопоглощения авторы предлагают покрывать образцы защитным лаком и повторно проводить испытания. После нанесения покрытия образцы сушили при комнатной температуре в течение 24 ч, затем проверяли и взвешивали.

При выдержке образцов в воде пузырьки воздуха, в отличие от первого испытания на водопоглощение, не выделялись, так как все поры были полностью закупорены лаком. Однако некоторые образцы всплывали, что может указывать на наличие внутренних пор.

После насыщения водой образцы взвешивали, затем оставляли сушиться при комнатной температуре в течение 24 ч. Далее каждые 24 ч проводили повторное взвешивание до достижения постоянной массы, после чего заново определяли процент водопоглощения (табл. 2).

Затем образцы испытывались на сжатие на испытательной машине 40КУ в соответствии с ГОСТ 10180–2012. Поведение образцов при испытании на сжатие соответствовало требованиям ГОСТ 10180–2012.

Перед испытанием боковые грани каждого образца шлифовали для обеспечения параллельности поверхностей (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Результаты определения процента водопоглощения представлены в табл. 2, а результаты проведенных испытаний на сжатие – в табл. 3.

Как видно из табл. 3, образцы 3 и 4 обладают наименьшим пределом прочности на сжатие – 14,74

Таблица 2. Процент водопоглощения после двух этапов

Table 2. Water absorption percentage after two stages

Номер образца	Водопоглощение W_m , %	
	первый этап	второй этап
1	44,70	1,93
2	53,30	2,64
3	16,60	2,33
4	15,70	13,12
5	27,60	0
6	24,30	12,50
7	58,30	41,34
8	62,20	4,66

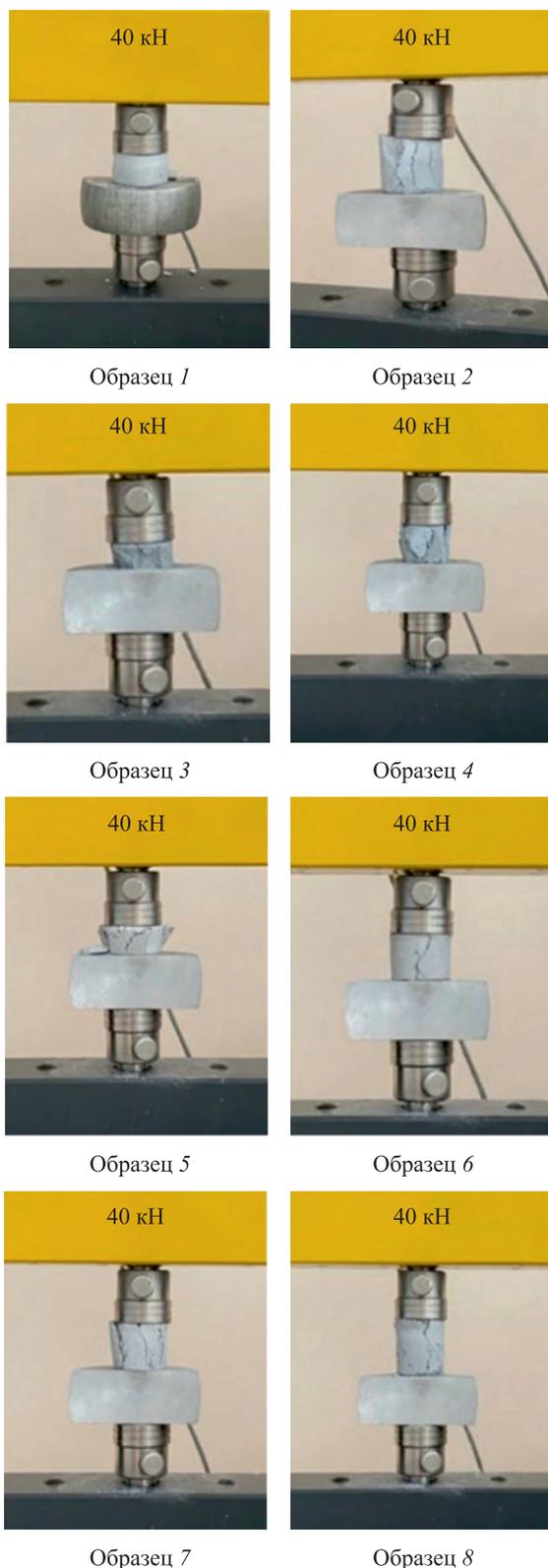


Рис. 2. Образец на испытательной машине до и после разрушения

Fig. 2. Sample on the testing machine before and after fracture

Таблица 3. Результаты испытания на сжатие

Table 3. Compression test results

Номер образца	Нагрузка P , кгс	Площадь поперечного сечения образца, F , см ²	Предел прочности при сжатии, $\sigma_{сж}$, кгс/см ²	Поведение образцов при испытании на сжатие
1	509,90	18,08	28,20	На боковой поверхности образца появились трещина и небольшое разрушение
2	445,60	18,08	24,64	На образце появилось несколько трещин, но разрушения не произошло
3	234,50	15,90	14,74	По краям образца появились трещины без разрушения при приложении нагрузки
4	273,30	15,90	17,18	По краям появились трещины и незначительное разрушение
5	416,04	21,22	19,60	Постепенное трещинообразование и незначительное разрушение по краям образца
6	662,80	18,84	35,18	Трещинообразование по всей площади поперечного сечения без разрушения
7	705,60	18,08	39,02	Трещинообразование и незначительное разрушение по краям образца
8	887,20	17,34	51,16	Появились трещины вдоль краев образца без разрушения

и 17,18 кгс/см² соответственно. В составе этих образцов присутствуют микросилика и шлак, при этом именно шлак оказывает наибольшее влияние на снижение прочности. Необходимо отметить, что в образце 4 содержание микросилики увеличилось в 2 раза, что привело к росту предела прочности. Однако при сравнении образцов 5 и 6, содержащих шлак и известь, можно отметить, что их сочетание способствует увеличению прочности на сжатие, особенно при повышенном содержании шлака.

Образцы 1 и 2, состоящие из микросилики и извести, демонстрируют средние значения предела прочности на сжатие – 28,20 и 24,64 кгс/см² соответственно.

Также следует отметить, что образцы с трехкомпонентным составом (микросилика–шлак–известь) обладают наибольшим пределом прочности на сжатие, особенно образец 8 (51,16 кгс/см²). В этом образце содержание микросилики увеличено вдвое по сравнению с образцом 7, что способствует упрочнению материала.

Таким образом, механические свойства образцов зависят от их состава. Например, микросилика способствует увеличению прочности, что видно на примере образца 4. Шлак также способен повышать предел прочности на сжатие, как показано на примере образца 6, в котором вторым компонентом является известь.

Диаграмма сжатия испытанных образцов представлена на рис. 3.

Разрушения на поверхности образцов 3 и 8 (с наименьшим и наибольшим значением предела прочности на сжатие) были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа EVO18 (Qarmet JSC) (рис. 4).

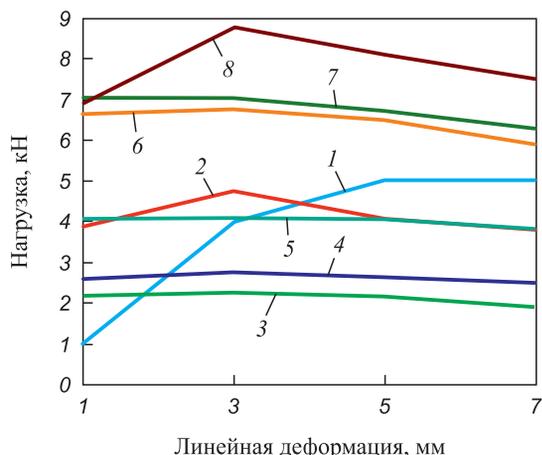


Рис. 3. Диаграммы сжатия при испытании (цифры у кривых – номер образца)

Fig. 3. Compression test diagrams (numbers on curves indicate sample number)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Этап 1. Согласно данным табл. 2, образцы 1 и 2, состоящие из микросилики и извести в соотношении 1:1 и 2:1, демонстрируют неудовлетворительный результат – водопоглощение этих образцов составляет 44,7 и 53,3 %. Вероятно, негативное влияние на эти значения оказывает второй компонент – гигроскопичная известь.

Образцы 3 и 4 содержат микросилику и шлак в соотношении 1:1 и 2:1 и демонстрируют хорошие показатели водопоглощения – 16,6 и 15,7 %. Возможно,

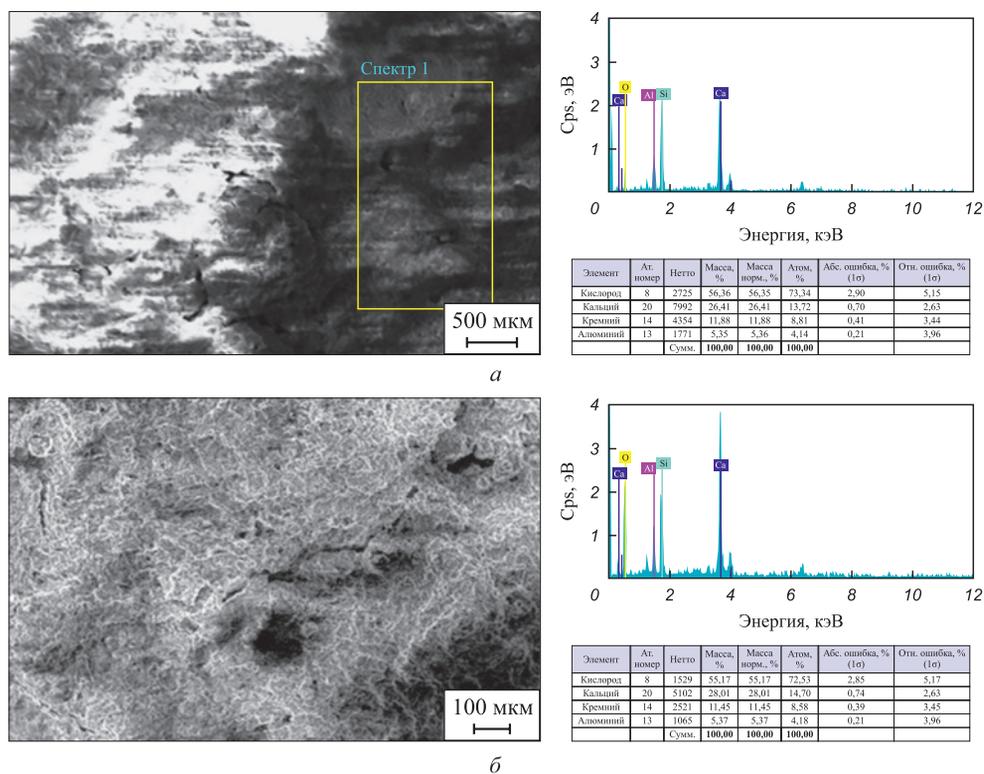


Рис. 4. Строение материала: а – образец 3, б – образец 8

Fig. 4. Material structure: а – Sample 3, б – Sample 8

исходные компоненты этих образцов уменьшают их гидрофильность.

Образцы 5 и 6 с соотношением шлака и извести 1:1 и 2:1, в составе которых шлак является основным компонентом, а известь вторым, также показали хорошие результаты: водопоглощение уменьшилось с 27,6 до 24,3 % при увеличении содержания шлака с 25 до 50 г.

Образцы 7 и 8, содержащие микросилику, шлак и известь в соотношении 1:1:1 и 2:1:1, показали неудовлетворительные результаты: водопоглощение образца 7 составило 58,3 %, а образца 8 – 62,2 %. Примечательно, что в образцах с более высоким содержанием микросилики процент водопоглощения выше.

Этап 2. На данном этапе после нанесения защитного лака образцы продемонстрировали значительное улучшение показателей водопоглощения. В частности, у образцов 1, 2, 3, 8 были отмечены самые низкие значения водопоглощения – 1,93, 2,64, 2,33 и 4,66 % соответственно. Образец 5 показал наилучший результат, его водопоглощение составило 0 %.

Образцы 4 и 7 имеют средние показатели водопоглощения – 13,12 и 12,5 % соответственно.

Образец 7 продемонстрировал худший показатель водопоглощения (41,34 %). Возможно, это связано с наличием макропор, а также непредсказуемым поведением компонентов при их соотношении 1:1:1 в сочетании с защитным лаком.

Таким образом, различные состав и соотношения компонентов приводят к разным конечным свойствам. Все компоненты ведут себя по-разному, что позволяет подобрать их в оптимальном соотношении для получения материала с заданными свойствами. Следует отметить, что образец 5 с составом шлак–известь в соотношении 1:1 показал наилучшие результаты водопоглощения, в то время как образец 7 с составом микросилика–шлак–известь в соотношении 1:1:1 продемонстрировал наиболее неудовлетворительные результаты.

Структура образца 3, обладающего самым низким показателем предела прочности на сжатие, отличается рыхлой структурой и неравномерным распределением компонентов микросилики и шлака по объему, что делает материал хрупким.

Полученные в ходе экспериментов данные соответствуют требованиям ГОСТ 12730.3–2020 «Водопоглощение» и ГОСТ 10180–2012 «Предел прочности на сжатие».

Выводы

В данной работе показана возможность использования промышленных и бытовых отходов для получения вторичных материалов с функциональным комплексом физико-механических свойств. Разработанные образцы с высокими показателями водопогло-

щения могут применяться в качестве облицовочного материала для интерьеров. Однако при нанесении защитного покрытия они могут использоваться и для наружной отделки. При этом материалы на основе микросилики и доменного шлака обладают удовлетворительными прочностными характеристиками (17,18 – 51,16 кгс/см²), которые расширяют область их возможного применения.

Совершенствование методов утилизации и переработки отходов является важной экономической задачей, решение которой изменит восприятие промышленных отходов как конечного продукта и будет способствовать более активному использованию методов рециклинга и смещению фокуса на получение экономической выгоды от этого процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Volokitin A.V., Volokitina I.E., Latypova M.A., Chigirinsky V.V., Kolesnikov A.S. Effect of controlled rolling on the structural and phase transformation. *Progress in Physics of Metals*. 2023;24(1):132–156. <https://doi.org/10.15407/ufm.24.01.132>
- Volokitina I., Volokitin A., Denissova A., Fedorova T., Lawrinuk D., Kolesnikov A., Yerzhanov A., Kuatbay Y., Liseitsev Yu. Effect of thermomechanical processing of building stainless wire to increase its durability. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;19:e02346. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02346>
- Volokitina I., Bychkov A., Volokitin A., Kolesnikov A. Natural aging of aluminum alloy 2024 after severe plastic deformation. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2023;12(3):564–566. <https://doi.org/10.1007/s13632-023-00966-y>
- Volokitina I., Sapargaliyeva B., Agabekova A., Ulyeva G., Yerzhanov A., Kozlov P. Study of changes in microstructure and metal interface Cu/Al during bimetallic construction wire straining. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;18:e02162. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02162>
- Гельманова З.С., Базаров Б.А., Мезенцева А.В., Конокбаева А.Н., Толешов А.К. Управление производственной безопасностью на горнодобывающих предприятиях Казахстана. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2-1):184–198. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-184-198>
Gelmanova Z.S., Bazarov B.A., Mezentseva A.V., Konakbaeva A.N., Tolshov A.K. Industrial safety management at mining enterprises in Kazakhstan. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2-1):184–198. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-184-198>
- Zhangabay N., Baidilla I., Tagybayev A., Suleimenov U., Kurganbekov Zh., Kambarov M., Kolesnikov A., Ibraimbayeva G., Abshenov Kh., Volokitina I., Nsanbayev B., Anarbayev Y., Kozlov P. Thermophysical indicators of elaborated sandwich cladding constructions with heat-reflective coverings and air gaps. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 18:e02161. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02161>
- Волокитина И.Е., Волокитин А.В. Изменение микроstructures и механических свойств сталемедной проволоки в процессе деформирования. *Металлург*. 2023;(2): 93–99. https://doi.org/10.52351/00260827_2023_02_93
Volokitina I.E., Volokitin A.V. Changes in microstructure and mechanical properties of steel-copper wire during deformation. *Metallurgist*. 2023;67:232–239. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01510-7>
- Nurumgaliyev A., Zhuniskaliyev T., Shevko V., Mukhambetgaliyev Y., Yerekeyeva G., Kelamanov B., Kuatbay Y., Badikova A. Modeling and development of technology for smelting a complex alloy (ligature) Fe-Si-Mn-Al from manganese-containing briquettes and high-ash coals. *Scientific Reports*. 2024;14(1):7456. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57529-6>
- Ruberti M. The chip manufacturing industry: Environmental impacts and eco-efficiency analysis. *Science of the Total Environment*. 2023;858(2):159873. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159873>
- Ma M., Wang T., Ke X., Liu Y., Song Y., Shang X., Li J., Han Q. A novel slag composite for the adsorption of heavy metals: Preparation, characterization and mechanisms. *Environmental Research*. 2023;216(2):114442. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114442>
- Ulyeva G.A., Akhmetova G.E., Tuyskhan K., Tulegenov A.V. State-of-the-Art and analysis of characteristics, properties, significance and application prospects of metallurgical slags. *Progress in Physics of Metals*. 2022;23:108–130. <https://doi.org/10.15407/ufm.23.01.108>
- Chang Z., Long G., Zhou J., Cong M. Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review. *Resources Conservation and Recycling*. 2020;154:104606. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104606>
- Raheem A., Sikarwar V., He J., Dastyar W., Dionysiou D.D., Wang W., Zhao M. Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. *Chemical Engineering Journal*. 2018;337:616–641. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.149>
- Ulyeva G.A., Akhmetova G.E., Tuyskhan K., Reshotrina E.N. Development of new composite materials based on “Metal-Non-metal” with improved functional properties. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2022;44:1137–1146. <http://dx.doi.org/10.15407/mfint.44.09.1137>
- Nowaka O., Enderle P., Varbanov P. Ways to optimize the energy balance of municipal wastewater systems: Lessons learned from Austrian applications. *Journal of Cleaner Production*. 2015;88:125–131. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.068>
- Пат. 2180013 С1 RU. Способ переплава пылевидных отходов кремния в среде твердожидкого алюминия / Гаврилин И.В., Кечин В.А., Колтышев В.И.; заявл. 17.07.2000; опубл. 27.02.2002.
- Пат. 2016110 С1 RU. Способ переработки отходов кремния / Лисай В.Э., Маленьких А.Н., Зверев Ю.А., Тепляков Ф.К., Горбунов В.А., Данилов С.Н.; заявл. 29.12.1991; опубл. 15.07.1994.
- Wang S., Zhou P., Liu X., Zhang S., Jia Q. Effect of modified coal tar pitch addition on the microstructure and properties of Al₂O₃-SiC-C castables for solid waste incinerators. *Ceramics International*. 2022;48(14):20778–20790. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.060>

19. Chen G., Li Y., Huang L., Zhang C., Luo X. Preparation of Al-Si alloy from silicon cutting waste: Enabling oxide surface removing and silicon utilization improving via vacuum sintering. *Science of the Total Environment*. 2023;863:161038.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161038>
20. Пат. C01B 33/18 RU. Способ получения осажденного кремнеземного наполнителя / Салькеева Л.К., Севостьянова К.А., Каколина Г.М., Тажбаев Е.М., Сугралина Л.М., Омашева А.В.; заявл. 04.02.2013; опубл. 15.11.2016. Бюл. № 15.
21. Liang S., Zhou X., Ruan S., Kastiukas G., Sun Y. Milled waste glass powder in magnesium-silicate-hydrate cement: Technical and environmental assessment. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2023;35(1):04022379.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000455](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000455)
22. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Beskopylny N., El'shaeva D. A study on the cement gel formation process during the creation of nanomodified high-performance concrete based on nanosilica. *Gels*. 2022;8(6):346.
<https://doi.org/10.3390/gels8060346>
23. Abdurakhmanov B.M., Kurbanov M.S., Nuraliev U.M., Andriyko L.S. Application of methane and micro silica for silicon carbide synthesis. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2022;61(5–6):298–307.
<https://doi.org/10.1007/s1106-022-00317-6>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Гульнара Анатольевна Ульева, ведущий специалист лаборатории металловедения и дефектоскопии Центра аналитического контроля, АО «Qarmet»; к.т.н, доцент кафедры «Металлургия и материаловедение», Карагандинский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-3600-1318

E-mail: g.ulyeva@tttu.edu.kz

Курметбек Туысхан, магистр, докторант, Карагандинский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-4272-2637

E-mail: k.tuyskhan@tttu.edu.kz

Екатерина Михайловна Мацугина, магистрант, Карагандинский государственный индустриальный университет

ORCID: 0009-0002-2550-4822

E-mail: y.matsugina@tttu.edu.kz

Ирина Евгеньевна Волокитина, к.т.н., профессор кафедры «Металлургия и материаловедение», Карагандинский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-2190-5672

E-mail: irinka.vav@mail.ru

Гульжайнат Есенжоловна Ахметова, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия и материаловедение», Карагандинский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0001-8244-5027

E-mail: g.akhmetova@tttu.edu.kz

Gulnara A. Ulyeva, Leading Specialist of the Laboratory of Metallography and Defectoscopy of the Analytical Control Center, JSC "Qarmet"; Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Metallurgy and Materials Science, Karaganda State Industrial University

ORCID: 0000-0002-3600-1318

E-mail: g.ulyeva@tttu.edu.kz

Kurmetbek Tuyskhan, Master Student, Doctoral, Karaganda State Industrial University

ORCID: 0000-0003-4272-2637

E-mail: k.tuyskhan@tttu.edu.kz

Ekaterina M. Matsugina, MA Student, Karaganda State Industrial University

ORCID: 0009-0002-2550-4822

E-mail: y.matsugina@tttu.edu.kz

Irina E. Volokitina, PhD, Prof. of the Chair of Metallurgy and Materials Science, Karaganda State Industrial University

ORCID: 0000-0002-2190-5672

E-mail: irinka.vav@mail.ru

Gulzhainat E. Akhmetova, PhD, Assist. Prof. of the Chair of Metallurgy and Materials Science, Karaganda State Industrial University

ORCID: 0000-0001-8244-5027

E-mail: g.akhmetova@tttu.edu.kz

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Г. А. Ульева – комплексное металлографическое исследование.

К. Туысхан – испытание образцов на сжатие, табличное и графическое представление результатов.

Е. М. Мацугина – испытание образцов на водопоглощение, статистическая обработка полученных данных.

И. Е. Волокитина – постановка задачи, анализ результатов исследований, формулировка выводов.

Г. Е. Ахметова – описание результатов, формулировка выводов, критический анализ литературы.

G. A. Ulyeva – complex metallographic study.

K. Tuyskhan – compression testing of samples, tabular and graphical presentation of results.

E. M. Matsugina – water absorption testing of samples, statistical processing of obtained data.

I. E. Volokitina – problem statement, analysis of research results, formulation of conclusions.

G. E. Akhmetova – description of results, formulation of conclusions, critical literary analysis.

Поступила в редакцию 20.10.2024

После доработки 10.12.2024

Принята к публикации 28.02.2025

Received 13.09.2024

Revised 10.12.2024

Accepted 28.02.2025