

Научная статья
УДК 666.7
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.041

КЕРАМИЧЕСКИЕ И ГИПЕРПРЕССОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ШЛАКОВ АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «КОЛЬСКАЯ ГМК»

**Ольга Васильевна Суворова¹, Надежда Кимовна Манакова²,
Евгений Александрович Курбатов³**

^{1, 2}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

³АО «Кольская ГМК», Мончегорск, Россия

¹ov.suvorova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4619-0869>

²n.manakova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4583-952>

³kurbatovea@kolagmk.ru

Аннотация

Представлены результаты исследований возможности применения шлака комбината «Североникель» для получения востребованных строительно-технических материалов. Предложены составы и технологические решения по получению материалов, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к изделиям строительным гиперпрессованным. Получены керамические материалы компрессионного формования с улучшенными механическими характеристиками, соответствующие нормативным требованиям на кирпич и камни керамические. Повышение температуры обжига керамики до 1 100 °С позволяет получить изделия, сопоставимые по физико-механическим свойствам с клинкерной керамикой.

Ключевые слова:

шлак цветной металлургии, шлакоотвал, гиперпрессованный строительный материал, стеновой керамический материал, прочность, водопоглощение, морозостойкость

Для цитирования:

Суворова О. В., Манакова Н. К., Курбатов Е. А. Керамические и гиперпрессованные материалы на основе шлаков акционерного общества «Кольская ГМК» // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 241–247. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.041.

Original article

CERAMIC AND HYPERPRESSED MATERIALS BASED ON SLAG FROM KOLA MMC

Olga V. Suvorova¹, Nadezhda K. Manakova², Evgeniy A. Kurbatov³

^{1, 2}Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre
“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

³Kola MMC, Monchegorsk, Russia

¹ov.suvorova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4619-0869>

²n.manakova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4583-9526>

³kurbatovea@kolagmk.ru

Abstract

The results are presented the research on the possibility of using the slag of the Severonickel processing plant to obtain high-demand construction and technical materials. Compositions and technological solutions for the production of materials that meet the requirements for hyper-pressed construction products are proposed. Compression-molded ceramic materials with improved mechanical characteristics have been obtained that meet the regulatory requirements for ceramic bricks and stones. Increasing the firing temperature of ceramics to 1 100 °C makes it possible to obtain products comparable in physical and mechanical properties with clinker ceramics.

Keywords:

non-ferrous metallurgy slag, slag dump, hyper-pressed building material, ceramic wall material, strength, water absorption, frost resistance

For citation:

Suvorova O. V., Manakova N. K., Kurbatov E. A. Ceramic and hyper-pressed materials based on slag from Kola MMC // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 241–247. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.041.

Введение

В России ежегодно накапливается порядка 120 млн т шлаков цветной металлургии. В настоящее время в отвалах комбината «Североникель» накоплены десятки миллионов тонн

электропечных шлаков, которые содержат сотни тысяч тонн цветных металлов. Проектная площадь, отведенная под шлакоотвал, составляет 67,0 га. Данный вид промышленных отходов, кроме силикатной составляющей, содержит никель, медь, кобальт и поэтому представляет практический интерес как возможный источник цветных металлов.

С учетом современных экологических требований и необходимости комплексной переработки техногенного сырья использование шлака комбината «Североникель» в стройиндустрии и для извлечения металлов позволило бы в значительной мере повысить технико-экономические показатели переработки медно-никелевого сырья.

В свою очередь, современные темпы развития промышленного и гражданского строительства сопровождаются увеличением объемов производства строительных материалов и изделий различного назначения. Одним из наиболее востребованных на рынке строительных материалов остается керамический кирпич. Однако требования к качеству кирпича постоянно возрастают, а разведанные природные запасы высококачественного сырья невосполнимо истощаются. Это является одной из главных проблем развития керамической промышленности России, в том числе и в Мурманской области, решение которой возможно за счет использования техногенных отходов, том числе и шлаков медно-никелевого производства.

Настоящая работа посвящена обоснованию перспектив утилизации отвальных шлаков комбината «Североникель» в производстве строительных керамических и гиперпрессованных материалов. С этой целью подготовлены и проведены исследования технологических проб шлака, подобраны составы, технологические параметры и изучены свойства синтезированных материалов с рекомендацией по их применению.

Результаты и обсуждение

Подготовка и исследование технологических проб шлака как сырья для получения гиперпрессованных и керамических материалов. Из представительной пробы отвального шлака комбината «Североникель» методом квартования выделена средняя проба в количестве 30 кг. Усредненную массу подвергли дроблению на щековой дробилке ШД 6М до крупности -5 мм с отсевом на вибрационном грохоте ГР 50. Для изготовления обжиговой керамики сырье в количестве 15 кг доизмельчали в фарфоровом барабане до крупности -0,1 мм. Остальную массу шлака использовали для получения гиперпрессованных материалов.

На рисунке 1 представлен внешний вид образцов шлака, используемых в исследованиях.

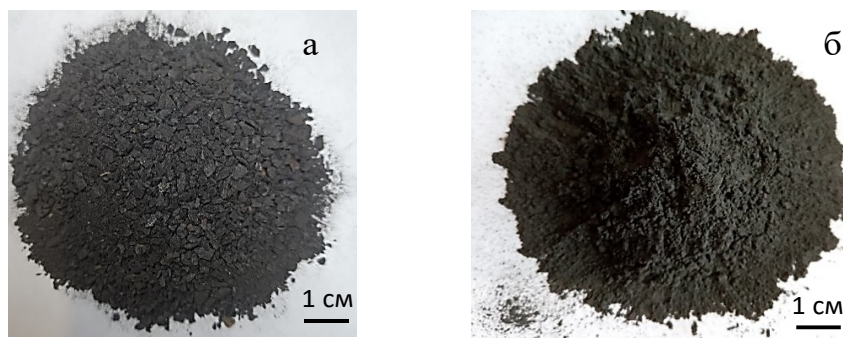


Рис. 1. Пробы шлака для гиперпрессованных (а) и керамических материалов жидкофазного спекания (б)

Гранулометрическая характеристика пробы шлака для синтеза гиперпрессованных материалов представлена в таблице 1.

Таблица 1

Фракционный состав шлака

Массовое содержание фракций, %, с размером частиц, мм							
+3	3–2	2–1,6	1,6–1	1–0,63	0,63–0,315	0,315–0,16	<0,16
1,85	10,87	1,92	27,97	14,77	17,43	9,35	15,84

Как видно (см. рис. 1, а, табл. 1), проба шлака после дробления характеризуется различной степенью дисперсности, что способствует формированию оптимальной упаковки частиц и, соответственно, улучшению технических характеристик изделий. В зависимости от зернового состава и содержания пылевидных частиц (ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия») используемую пробу шлака можно охарактеризовать как материал повышенной крупности (присутствуют зерна более 3,5 мм). Проба шлака для обжиговой керамики (см. рис. 1, б) по аналогичной классификации можно отнести к классу «тонкий» и «очень тонкий».

Радиационно-гигиеническими исследованиями установлено, что шлак характеризуется радиоактивностью 48 ± 8 Бк/кг, что существенно ниже нормативного значения общей эффективной удельной активности (370 Бк/кг). Это дает основание для использования их без ограничений по радиационному фактору при производстве строительных материалов.

Истинная плотность сырья, определенная пикнометрическим методом, составляет $3,66 \text{ г/см}^3$. Насыпная плотность шлака для гиперпрессования соответствует $1,81 \text{ г/см}^3$, для обжиговой керамики — $1,41 \text{ г/см}^3$. Влажность материала, используемого в исследованиях, 0,08 %.

При использовании различного сырья для производства строительных материалов методом гиперпрессования важно знать количество минералов-примесей, отнесенных к вредным для заполнителей бетонов [1]. На основе проведенного минералогического анализа установлено наличие в шлаке нерудных минералов, таких как оливин, фаялит, форстерит, диопсид, кварц. При взаимодействии этих минералов с активными компонентами портландцемента либо не происходит объемного эффекта, либо наблюдается благоприятный объемный эффект, не приводящий к разрушению конечного продукта. Методом РФА в сырье не обнаружены аморфные разновидности диоксида кремния, сера, сульфиды, сульфаты, слюда, галоидные соединения, включающие в себя водорастворимые хлориды, уголь и относящиеся к вредным компонентам в соответствии с нормативными требованиями. По результатам химанализа содержание серы в пересчете на SO_3 и водорастворимые хлориды в пересчете на ион хлора находятся в допустимых пределах (ГОСТ 5578-2019 «Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии для бетонов. Технические условия»).

Изучение возможности получения гиперпрессованных материалов. Ранее нами была проведена оценка отходов обогащения апатитонелефиновых, вермикулитовых, медно-никелевых и железных руд АО «Олкон» как сырья для производства строительных материалов методом гиперпрессования. Разработаны условия получения качественных стеновых материалов (кирпича, облицовочной плитки). В настоящей работе исследована возможность утилизации отвального шлака АО «Североникель» с получением аналогичной продукции.

Технология гиперпрессования описана в работе [2] и состоит из двух основных операций: приготовление формовочной смеси (прессмассы) и прессование изделий.

Смесь для изготовления изделий включает три компонента: состав 1, мас. % — шлак 92, портландцемент 8, вода (сверх 100 %) 8; состав 2 — шлак 85, портландцемент 15, вода (сверх 100 %) 8. Портландцемент использовали марки от 300 до 500.

Из смеси указанных составов изготавливали кубики $40 \times 40 \times 40$ мм для определения прочности при сжатии и плитки $40 \times 40 \times (6-8)$ мм для определения прочности при изгибе. Прессование образцов проводилось на гидравлическом прессе при удельном давлении 100, 200 и 300 МПа. На производстве приготовленные изделия выдерживают на складе в течение 3–5 сут, за это время они набирают 60–70 % от конечной прочности. Время полного созревания изделий составляет 28–29 сут.

Исследования зависимости свойств материала от состава, сроков твердения и давления прессования показали закономерный рост прочностных характеристик образцов с повышением содержания цемента в смесях. Увеличение почти в два раза количества цемента (с 8 до 15 %) приводит к росту прочности до 60 %.

Наиболее эффективно для приготовления изделий применение давления прессования 300 МПа. Наилучшие результаты получены для состава с 15 % цемента: в возрасте 28 сут $R_{сж}$ составила 54,92 МПа, а $R_{изг}$ — 9,33 МПа. Причем уже в возрасте 7 сут изделия имеют довольно высокую прочность, соответствующую марке М500.

Свойства гиперпрессованных материалов после 28 сут твердения представлены в табл. 2.

Выборочно определяли морозостойкость и теплопроводность образцов. Испытания на теплопроводность проводили на установке для определения коэффициента теплопроводности строительных материалов в образцах, изготовленной в ФГУП ВНИИФТРИ (Менделеево, Московская обл.).

Таблица 2

Свойства гиперпрессованных материалов

Давление прессования, МПа	Плотность, кг/м³	Предел прочности, МПа		Водопоглощение, %
		при сжатии	при изгибе	
Состав № 1				
100	2680	29,14	3,72	9,12
200	2750	34,15	3,36	7,23
300	2800	34,94	5,19	6,14
Состав № 2				
100	2720	45,53	6,87	5,99
200	2790	49,60	8,19	5,86
300	2820	54,92	9,33	5,32

Изделия, изготовленные при давлении прессования 100 МПа, выдержали 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания, что соответствует марке F100. Высокая морозостойкость гиперпрессованного кирпича свидетельствует о долговечности данного вида стенового материала. Коэффициент теплопроводности составляет 1,24 Вт/м·К, что несколько превышает этот параметр для керамического и силикатного кирпичей. Использование предварительной магнитной сепарации позволяет снизить показатель теплопроводности материала на 13 % (до 1,075 Вт/м·К). Водопоглощение в зависимости от давления прессования находится в интервале 6,14–9,12 % для образцов с 8 % цемента и 5,32–5,99 % для образцов с 15 % цемента.

Как видно из представленных данных, полученные материалы удовлетворяют требованиям, предъявляемым к кирпичу гиперпрессованному (ТУ 5741-021-00284753-99 «Изделия строительные гиперпрессованные. Технические условия»).

Для улучшения декоративных характеристик изделий проведено расцветивание материала с использованием минерального сырья и красителей: пегматита, амазонита, мрамора, железного сурика, оксида хрома и прочих строительных пигментов. Окрашивание кирпича пигментами происходит однородно по всему объему, так что цвет сохраняется как при раскалывании, так и при обточке. Гиперпрессованные изделия имеют привлекательный внешний вид.

Полученные материалы можно рекомендовать для обустройства фундаментов, организации цокольных этажей и несущих конструкций, но в то же время его можно использовать для отделочных работ. Околооконные участки, каминные, фасады зданий, беседки и объекты ландшафтного дизайна — этот материал применяется практически во всех работах по декорированию.

Изучение возможности получения керамических материалов методом жидкофазного спекания. Ранними работами нами была показана возможность получения керамических строительных материалов на основе хвостов обогащения медно-никелевых, апатитонепелиновых, вермикулитовых, железных руд без использования первичного сырья (глин) и предложен ряд способов улучшения технических характеристик керамических изделий [3]. Представляло интерес определение возможности применения металлургических шлаков в получении данного вида изделий. Применение в керамическом производстве каждого типа хвостов по отдельности затруднено из-за особенностей их состава. Поэтому в настоящей работе материалы получали на основе масс, составленных из смеси хвостов обогащения и шлака в различных соотношениях, приведенных в табл. 3. Химический состав используемых сырьевых материалов приведен в табл. 4. Составы керамических масс выбраны с учетом ранее проведенных исследований.

Таблица 3

Составы керамических масс

Компонент	Содержание, мас. %		
	1	2	3
Шлак	30	40	50
АНХ	40	40	30
ОлХ	30	20	20

Примечание. АНХ — апатитонепелиновые хвосты; ОлХ — хвосты обогащения железистых кварцитов (г. Оленегорск).

Таблица 4

Химический состав сырьевых материалов

Сырьевой компонент	Содержание оксидов, мас. %											
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	п. п. п.
Шлак	36,19	0,27	5,12	8,88	33,65	4,07	7,87	0,12	2,79	0,53	0,27	3,35
АНХ	41,00	2,53	21,20	5,85	2,63	6,01	1,19	0,27	10,15	5,85	2,20	1,00
ОлХ	69,82	0,16	7,95	4,75	1,53	3,49	2,74	0,08	2,50	1,06	0,05	0,64

Сырье по химическому составу близко к сырьевым материалам, используемым в технологии керамики, поскольку валовая доля большинства из них представлена оксидами SiO₂, CaO, Al₂O₃, MgO, Fe_xO_y. Отличительная особенность шлака — высокое содержание оксидов железа, которое интенсифицирует процессы жидкофазного спекания за счет образования легкоплавких эвтектик.

Керамические изделия строительного назначения получали методом полусухого прессования с использованием жидкофазного спекания, описанным в [3]. Испытания полученных образцов проводили согласно стандартным для строительной керамики методикам. Результаты изучения свойств керамических материалов трех составов в зависимости от технологических параметров синтеза представлены в табл. 5.

Как видно из представленных данных, с увеличением температуры обжига прочность образцов керамики непрерывно растет и закономерно снижается водопоглощение, что можно объяснить уплотнением материала за счет жидкофазного спекания. При температуре 1 060 °С и выше в результате интенсивного образования пиропластичной массы возможно получение строительных керамических материалов высшей категории качества (марка кирпича по прочности М300).

Для определения коэффициента теплопроводности были приготовлены образцы диаметром 100 и высотой 20 мм. Для керамики из смеси состава № 2, обожженной при температуре 1 050 °С, коэффициент теплопроводности соответствует 0,636 Вт/м·К. Для обеспечения снижения данного показателя из материала шлака предварительно отделялась магнитная фракция, в результате чего установлено снижение теплопроводности материала до 0,587 Вт/м·К.

Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать массы для получения стеновой строительной керамики — полнотелого и пустотелого кирпича с улучшенными механическими характеристиками (ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия»). Повышение температуры обжига до 1 100 °С позволяет получить изделия, сопоставимые по физико-механическим свойствам с клинкерной керамикой (ГОСТ 32311-2012 «Кирпич керамический клинкерный для мощения. Технические условия»).

Внешний вид гиперпрессованных и керамических материалов жидкофазного спекания представлены на рис. 2.

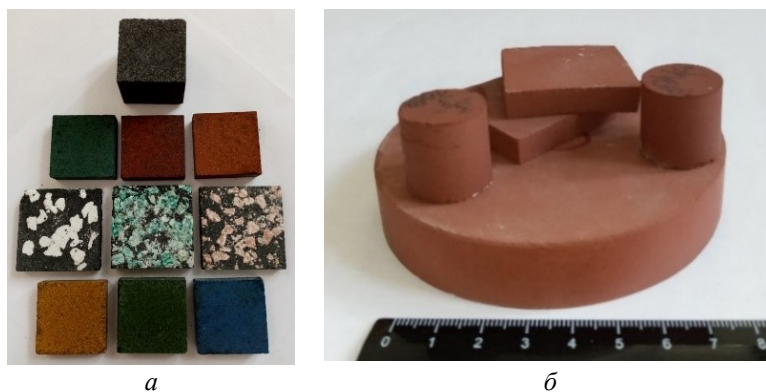


Рис. 2. Образцы гиперпрессованных (а) и обожженных (б) керамических материалов

Таблица 5
Физико-механические свойства керамических материалов

Температура обжига, °С	Средняя плотность, г/см ³	Истинная плотность, г/см ³	Пористость, %	Состав № 1		Водопоглощение, %	Морозостойкость, циклы
				Предел прочности, МПа при сжатии	МПа при изгибе		
1000	1,66	2,94	43,54	1,59	2,15	24,3	—
1030	1,73	2,94	41,16	11,42	4,86	22,82	—
1050	1,82	2,94	34,69	18,43	6,69	20,29	>15
1060	1,96	2,94	33,56	29,70	13,20	17,81	—
1070	2,05	2,95	30,50	40,35	12,93	14,21	—
1100	2,60	2,95	11,86	127,8	33,22	0,89	100
Состав № 2							
1000	1,69	2,98	43,29	6,15	3,25	23,51	—
1030	1,73	2,98	41,95	13,24	6,54	21,20	—
1050	1,87	2,99	37,25	25,47	8,13	18,99	>25
1060	2,03	2,98	32,11	39,58	12,19	15,72	—
1070	2,08	2,99	30,43	46,26	14,00	11,85	—
1100	2,65	2,99	11,37	86,4	46,28	1,05	100
Состав № 3							
1000	1,73	3,07	43,65	6,90	3,17	23,48	—
1030	1,76	3,07	42,67	13,68	5,74	21,15	—
1050	1,94	3,08	36,81	25,2	6,63	17,26	>50
1060	2,07	3,08	32,79	36,48	13,54	14,17	—
1070	2,13	3,08	30,84	46,89	15,40	13,58	—
1100	2,72	3,08	11,68	142,1	38,66	1,63	100

Выводы

В статье представлены результаты исследований, показывающие принципиальную возможность получения керамических строительных материалов с использованием отвальных шлаков комбината «Североникель» методом гиперпрессования и жидкофазного спекания. Получены материалы, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к изделиям строительным гиперпрессованным. Предложены рациональные технологические параметры процесса получения эффективных изделий. Показана возможность придания материалу декоративного внешнего вида с использованием минерального сырья и пигментов.

Получены керамические материалы компрессионного формования с улучшенными механическими характеристиками, соответствующие нормативным требованиям на кирпич и камни керамические. Повышение температуры обжига до 1 100 °С позволяет получать изделия, сопоставимые по физико-механическим свойствам с клинкерной керамикой. В керамических массах возможно использование до 50 мас. % шлака в составе композиции с хвостами обогащения апатитонефелиновых руд и железистых кварцитов.

Список источников

1. Макаров В. Н. Экологические проблемы хранения и утилизации горнопромышленных отходов. Апатиты: КНЦ РАН, 1998. Ч. 1. 126 с.; Ч. 2. 146 с.
2. Суворова О. В., Макаров Д. В., Маслобоев В. А., Курбатов Е. А. О возможностях использования хвостов обогащения АО «Кольская ГМК» // Цветные металлы. 2019. № 11. С. 57–60. doi: 10.17580/tsm.2019.11.07 = Tsvetnye Metally. 2019. No. 11. pp. 57–60 doi: 10.17580/tsm.2019.11.07.
3. Suvorova O., Kumárova V., Nekipelov D., Selivanova E., Makarov D., Masloboev V. Construction ceramics from ore dressing waste in Murmansk region // Construction and Building Materials. 2017. V. 153. P. 783–789.

References

1. Makarov V. N. *Ekologicheskie problemy hraneniya i utilizacii gornopromyshlennykh othodov* [Environmental Problems of Storage and Utilization of Mining Waste]. Apatity, KNC RAN [KSC RAS], 1998, Ch. 1, 126 p.; Ch. 2. 146 p. (In Russ.).
2. Suvorova O. V., Makarov D. V., Masloboev V. A., Kurbatov E. A. O vozmozhnostyakh ispol'zovaniya hvostov obogashcheniya AO "Kol'skaya GMK" [On the possibilities of using ore dressing tailings of enrichment of Kola MMC]. *Cvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2019, no. 11, pp. 57–60. (In Russ.).
3. Suvorova O., Kumárova V., Nekipelov D., Selivanova E., Makarov D., Masloboev V. Construction ceramics from ore dressing waste in Murmansk region. *Construction and Building Materials*, 2017, V. 153, pp. 783–789.

Информация об авторах

О. В. Суворова — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

Н. К. Манакова — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

Е. А. Курбатов — директор департамента по экологии и устойчивому развитию Кольской ГМК.

Information about the authors

O. V. Suvorova — PhD (Engineering), Senior Researcher;

N. K. Manakova — PhD (Engineering), Senior Researcher;

E. A. Kurbatov — Director of the Department of Ecology and Sustainable Development of the Kola MMC.

Статья поступила в редакцию 30.05.2025; одобрена после рецензирования 20.06.2025; принята к публикации 04.07.2025.
The article was submitted 30.05.2025; approved after reviewing 20.06.2025; accepted for publication 04.07.2025.