



Пористый наполнитель на основе ферропыли, бентонита и жидкостекольной композиции

А.В. Балановская¹, Е.С. Абдрахимова²✉

¹Самарский государственный экономический университет, Самара, Россия

²Самарский университет. Национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва, Самара, Россия

Аннотация. В статье представлено присвоение статуса сырья по ведущим оценочным характеристикам ферропыли из самораспадающихся шлаков для создания пористых наполнителей на базе бентонита и жидкостекольного соединения, употребляемых в качестве соединяющих компонентов, которые обладают уникальными связующими и клеящими свойствами. Для анализа ферропыли и бентонита микроструктуры и химических составов был задействован электронный микроскоп JSM 6390A фирмы Jeol (Япония). Диагностика идентификации минеральных составов ферропыли и бентонита была определена посредством петрографии с привлечением иммерсионных жидкостей, прозрачных шлифов, аншлифов и микроскопов МИН-7 и МИН-8. Исследуемая ферропыль из самораспадающихся шлаков является техногенным сырьем электрометаллургического производства феррохрома предприятия ферросплавов филиала АО ТНК «Казхром» г. Актобе и находится в пылевидном состоянии. Основным минералом ферропыли, использующегося в качестве наполнителя (отошителя), является γ -двухкальциевый силикат γ - $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, содержание которого 58 %. Исследования установили, что в состав анализируемого шлака входят огнеупорные минералы: магнезиальная шпинель, оксид хрома и мервинит, которые повышают прочность пористого наполнителя на сжатие, огнеупорность и потери при пятиминутном кипячении. Получены пористые наполнители на основе ферропыли из самораспадающихся шлаков, бентонита и жидкостекольной композиции, теплопроводность которых не превышает 0,25 Вт/(м·°C). Анализ выявил, что на внешнем облике из оптимального состава образца пористость является менее выраженной, чем в пределах внутренних границ, потому что пористость внутри образца характеризуется порами, не имеющими выхода, т. е. поры замкнутые (запечатанные). Зарегистрировано патентное право на способ создания пористого наполнителя.

Ключевые слова: ферропыль, бентонит, жидкое стекло, пористый наполнитель, пористость, замкнутые поры

Для цитирования: Балановская А.В., Абдрахимова Е.С. Пористый наполнитель на основе ферропыли, бентонита и жидкостекольной композиции // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2026. Т. 16. № 1. С. 81–91. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2026-1-81-91>. EDN: OAUYYI.

Original article

Porous filler based on ferro-dust, bentonite and liquid glass composition

Anna. V. Balanovskay¹, Elena. S. Abdrakhimova²✉

¹Samara State University of Economics, Samara, Russia

²Samara University. National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

Abstract. The article presents the assignment of the status of raw materials according to the leading evaluation characteristics of self-disintegrating slag for the creation of porous aggregates based on bentonite and liquid glass compounds used as connecting components, which have unique binding and adhesive properties. A JSM 6390A electron microscope from Jeol (Japan) was used to analyze ferro-dust

© Балановская А.В., Абдрахимова Е.С., 2026

and bentonite microstructure and chemical compositions. The diagnosis of the identification of the mineral compositions of ferro-dust and bentonite was determined by petrography using immersion fluids, transparent grinders, full grinders, and MIN-7 and MIN-8 microscopes. The investigated ferro-dust from self-decaying slags is a technogenic raw material of the electrometallurgical production of ferrochrome by the ferroalloys enterprise of the branch of TNK Kazchrome JSC in Aktobe and is in a pulverized state. The main ferro-dust mineral used as a filler is γ -bicalcium silicate γ -2CaO $\cdot$ SiO₂, which contains 58 %. Studies have established that the composition of the analyzed slag includes fire-resistant minerals: magnesia spinel, chromium oxide and mervinite, which increase the compressive strength of the porous aggregate, fire resistance and losses during five-minute boiling. Porous fillers based on ferro-dust from self-decomposing slags, bentonite and a liquid-glass composition, the thermal conductivity of which does not exceed 0.25 W/(m $\cdot$ °C), were obtained. The analysis revealed that the porosity on the outer appearance of the optimal composition of the sample is less pronounced than within the inner boundaries, because the porosity inside the sample is characterized by pores that have no outlet, i.e. the pores are closed (sealed). A patent right has been registered for a method of creating a porous filler.

Keywords: ferro-dust, bentonite, liquid glass, porous filler, porosity, closed pores

For citation: Balanovskaya A.V., Abdrakhimova E.S. Porous filler based on ferro-dust, bentonite and liquid glass composition. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2026;16(1):81-91. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2026-1-81-91>. EDN: OAUYYI.

ВВЕДЕНИЕ

Экологический климат в подразделениях металлургического производства

В Российской Федерации металлургическая промышленность стала провоцировать напряженность в экосистеме и продолжает истощать естественные запасы природного потенциала в процессе выработки продукции в ходе производственного цикла, поэтому металлургическое производство в консолидации с горнодобывающей продукцией становится одним из основных загрязнителей экологического пространства [1–3].

Индустриальные активные мероприятия на металлургических комбинатах сопряжены с аккумуляцией массивных объемов отходов: шлаков, отработанных стоков воды, пыли и других альтернативных сбросов [4–6].

Ключевыми факторами интенсивной степени загрязненности являются локализация промышленных объектов в шаговой доступности от жилых территорий, эксплуатация обветшалых и уже отработанных технологических решений и производственных мощностей, неадекватное усовершенствование технологических комплексов для фильтрации, дезактивации и детоксикации отходов. Наиболее губительными итогами деятельности металлургических предприятий являются высокая загрязненность атмосферной среды, которая оказывает пагубное влияние на индивидуальное и репродуктивное здоровье граждан, деградация биологических характеристик с повышением уровня концентрации вредных веществ в воде, деструкция и потеря плодородного слоя почвы с возникновением индустриальных пустошей в

окружении масштабных промышленных комплексов и проблема со здоровьем, потеря иммунитета, рост заболеваемости в зонах присутствия металлургических предприятий.

Отходы металлургии только частично задействованы в народном хозяйстве, а значительная часть аккумулируется в отвалах, занимая большие площади. В 2019 г. был зафиксирован максимальный рекорд по масштабной выработке производственных отходов металлургии, объем которых составил 7,78 млрд т, что практически в четыре раза превышает объем мусора от промышленности, реализованного в 2002 г., на период начала стартовых наблюдений (2 млрд т), что было установлено исследовательской группой аудиторско-консалтинговых услуг сети FinExpertiza [5–7].

По информации и прогнозам авторитетных геологов уже в грядущие два-три десятилетия вполне возможно появление существенного дефицита природных ресурсов для создания керамических изделий строительного использования [8, 9].

Применение вторичного сырья (отходов производств) в качестве частичной альтернативы природному позволит снизить масштабы потребления природных ресурсов в производстве строительных материалов и минимизирует экологическое давление.

Теплоизоляционные материалы

К классу теплоизоляционных материалов относятся легковесный кирпич и пористые наполнители. По причине возрастания тарифов на энергоносители формируется актуальная задача в аннулировании утечки тепла в помещениях с отопительной инфраструктурой, а в

зонах с экстремально жарким климатом минимизация издержек на кондиционированные и вентиляционные услуги [10–12].

Для достижения принципиальных целей по минимизации теплопотерь важно иметь современные бюджетные утеплители (с использованием отходов производств) на основе жидкостекольных композиций. Для возведения экологических объектов с высокой энергоэффективностью к приоритетным теплоизоляционным материалам следует причислить такую категорию утеплителей как мелкопористые изделия типа керамзит. Керамзит может быть изготовлен промышленным способом при обязательном условии присутствия в необходимом объеме вспучивающейся глины – монтмориллонитовой по минеральному составу. Мелкопористые структуры с избыточным количеством замкнутых ячеек именуются пористыми заполнителями, в которых в качестве связующего элемента используется жидкостекольная композиция, которая обладает консолидирующими и клеящими способностями. Во время анализа работ [9, 13, 14] были установлены уникальные свойства жидкого стекла: пиропластическая масса жидкого стекла, после исчезновения воды в виде пара, увеличивается в объеме и вспучивается, имеет повышенные адгезионные показатели и самопроизвольно отвердевает. Жидкое стекло относится к категории крупнотоннажного товара, представляет собой результат химического синтеза сырья неорганического происхождения, реализуется в крупных масштабах практически во всех индустриально развитых странах мира и может беспрепятственно легко проникать в мельчайшие поры и трещины [13–15].

Индустрия керамических пористых заполнителей, являющейся продукцией массового производства, чувствительно испытывает нехватку естественного традиционного сырья, которое можно заменить на отходы производства.

Целью работы является присвоение статуса сырья по ведущим оценочным характеристикам ферропыли из самораспадающихся шлаков для создания пористых заполнителей на базе бентонита и жидкостекольного соеди-

нения, употребляемых в качестве соединяющих компонентов, которые обладают уникальными связующими и клеящими свойствами.

МЕТОДЫ

В статье показаны детализированные поэлементные химические составы ферропыли и монтмориллонитовая глины с их внутренней структурой, т. е. электронное фото с практическим использованием сканирующего микроскопа с электронным лучом JSM 6390A фирмы Jeol (Япония) [3, 9, 10]. Идентификация и опознавание в сырьевых составляющих аморфных и кристаллических минералогических компонентов были определены с помощью петрографических техник и механизмов Nu-2E, МИН-7 и МИН-8 при употреблении препаратов с погружением (иммерсионных), прозрачных срезов (прозрачные шлифы) и полированных шлифов (аншлифы). Диагностика габаритов включений в анализируемых сырьевых компонентах была исследована посредством металлографического осмотра при 200-кратном увеличении на микроскопе МИН-8. Сырьевые включения при растворении переходили в спиртовой раствор, а затем размещались на поверхности стекла и запечатлевались камерой. Управление измерительной шкалой микромера (1 дел. = 0,001 мм) компетентное и достойное доверия, дает шанс определить среднюю мерность компонентов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сырьевые материалы

Для получения пористого заполнителя были задействованы следующие компоненты: жидкое стекло в качестве связующего, монтмориллонитовая глина – пластифицирующая добавка и ферропыль из самораспадающихся шлаков низкоуглеродистого феррохрома – наполнитель (отощитель). Химические составы монтмориллонитовой глины и ферропыли из самораспадающихся шлаков представлены в таблицах: оксидный состав в табл. 1, поэлементный в табл. 2, в табл. 3 – фракционный (гранулометрический) состав, в табл. 4 – технологические показатели. На рис. 1 представлены металлографические анализы, минералогический – на рис. 2, а микроструктура – на рис. 3.

Таблица 1. Усредненный химический оксидный состав сырьевых компонентов

Table 1. Average chemical oxide composition of raw materials

Компонент	Сырьевые материалы							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	R ₂ O	ППП
Бентонитовая глина	58,89	14, 43	7,2	4,8	2,7	–	3,4	7,85
Ферропыль из самораспадающихся шлаков	31,05	7,75	1,70	43,15	7,55	7,40	1,40	–

Примечание: ППП – потери при прокаливании; R₂O + Na₂O + K₂O

Таблица 2. Поэлементный химический состав сырьевых компонентов
Table 2. Element-wise chemical composition of raw materials

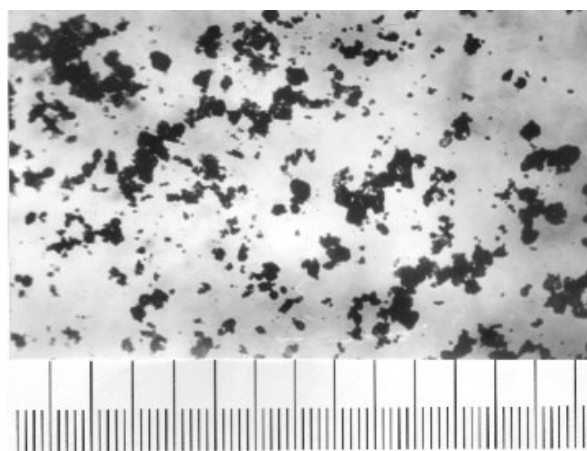
Компоненты	Содержание элементов, мас.%, %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cr	K	Ca	Fe
Бентонитовая глина	1,30	55,8	0,27	1,00	13,46	18,47	–	3,99	2,46	3,25
Ферропыль из самораспадающихся шлаков	–	43,1	0,8	4,5	4,6	18,4	4,2	0,2	23,8	0,4

Таблица 3. Фракционный состав сырьевых компонентов
Table 3. Fractional composition of raw materials

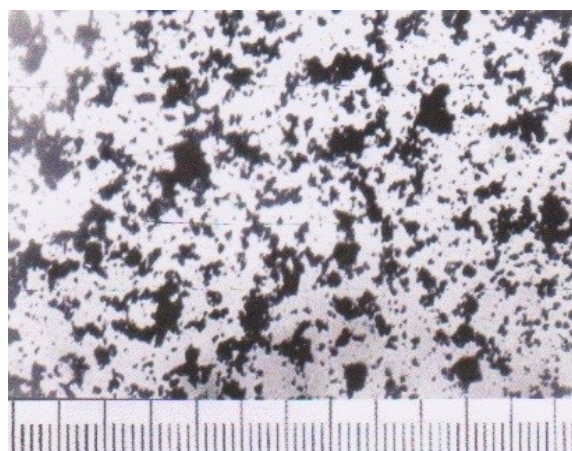
Компонент	Содержание фракций в %, размер частиц в мм				
	>0,063	0,063–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001
Бентонитовая глина	3	5	6	7	79
Ферропыль из самораспадающихся шлаков	1,4	14,5	24,1	26,4	40,8

Таблица 4. Технологические показатели сырьевых компонентов
Table 4. Technological indicators of raw materials components

Техногенное сырье	Плотность г/см ³	Огнеупорность, °C		
		Начало деформации	Размягчение	Температура плавления, °C
Бентонитовая глина	1,8	1180	1200	1230
Ферропыль из самораспадающихся шлаков	3,2	1540	–	1600



a



b

Рис. 1. Металлографический анализ сырьевых компонентов: а – монтмориллонитовая глины; б – ферропыль из самораспадающихся шлаков низкоуглеродистого феррохрома
Fig. 1. Metallographic analysis of raw materials: a – montmorillonite clay; b – ferro-dust from self-dissolving slags of low-carbon ferrochrome

Жидкое стекло

Для жидких стекол химический состав основан на наличии SiO_2 и других оксидов, в зависимости от конкретной конфигурации их состояния в растворе $\text{R}_2\text{O}_n\text{SiO}_2 + m\text{H}_2\text{O}$, в котором щелочной катион символизируется как R (Na^+ , K^+ , Li^+ или NH_4^+ , n – для жидкого стекла

является силикатным модулем (это отношение кремнеземистого компонента к щелочному)), а m – это количество молекул воды в жидком стекле. Употребляемое как связующее звено товарное натриевое жидкое стекло, согласно требованию ГОСТ 13071, имеет плотность 1,41 г/см³ [9].

Обладая высокой адсорбционной активностью используемое жидкое стекло затрудняет и осложняет процедуру перемешивания. По этой причине в жидкое стекло вводят коагулятор – хлорид натрия (ГОСТ 13830-97, производства ОАО «Бассоль»), дробленный до фракции 0,3 мм.

Количество введенного в жидкое стекло от 2 до 7 % коагулятора вызывает растворимость и снижение силикатного модуля, в результате чего жидкое стекло модифицируется в жидкостекольную композицию, которая переходит в твердое состояние [16–18].

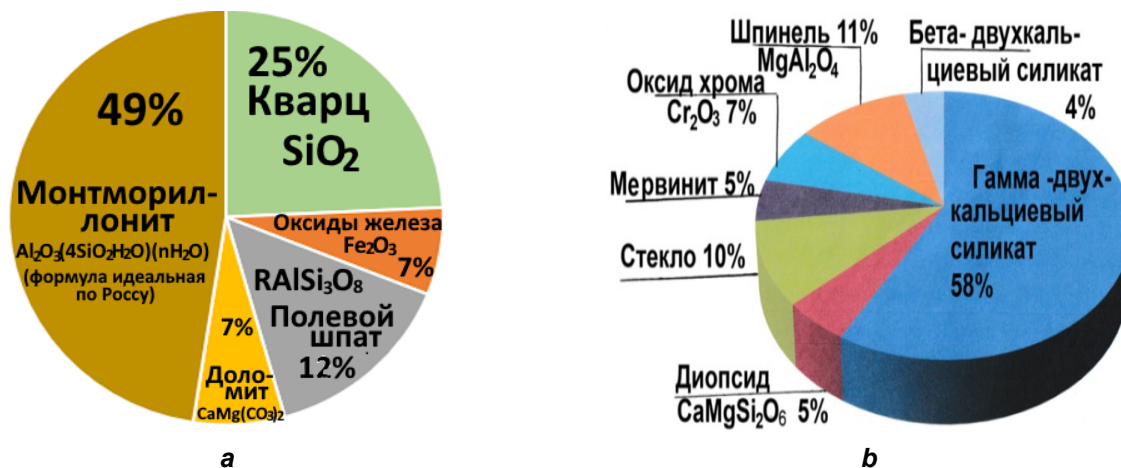


Рис. 2. Минералогический состав сырьевых компонентов: а – монтмориллонитовая глина; б – ферропыль из самораспадающихся шлаков низкоуглеродистого феррохрома
Fig. 2. Mineralogical composition of raw materials: а – montmorillonite clay; б – ferro-dust from self-dissolving slags of low-carbon ferrochrome waste

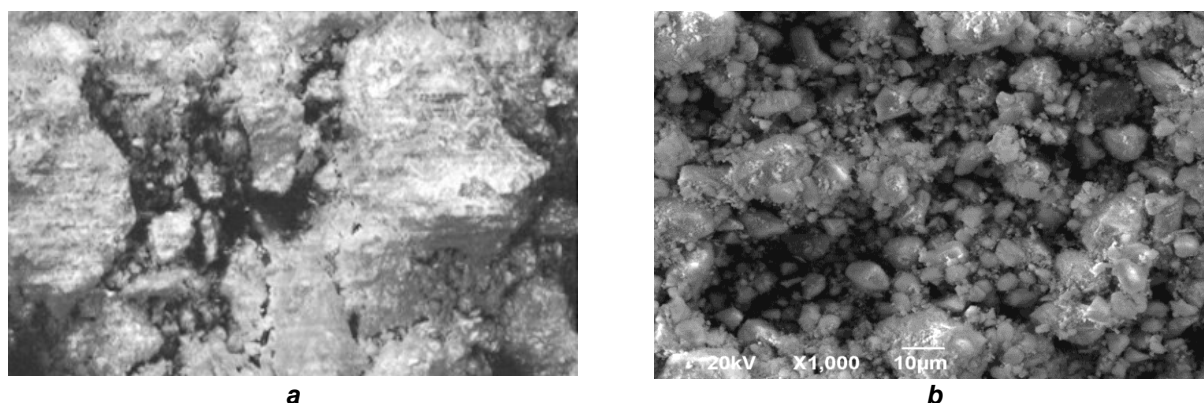


Рис. 3. Микроструктура сырьевых компонентов: а – бентонитовая глина; б – ферропыль из самораспадающихся шлаков низкоуглеродистого феррохрома
Fig. 3. Microstructure of raw materials: а – bentonite clay; б – ferro-dust from self-dissolving slags of low-carbon ferrochrome

Монтмориллонитовая глина

Диспергирующаяся и распадающаяся в водной среде до стадии коллоидной консистенции глина, образуемая преимущественно из минералов типа монтмориллонита, называется бентонитовой глиной [19, 20].

Бентонитовые глины, включающие гидрофильные тонкодисперсные компоненты, добавляются в композиции для возрастания формовочных (пластичных) свойств, например, керамических масс. Монтмориллонит проявляет слоистую морфологию с чередующимися слоями

(рис. 3а), матрица которого разделена на трехслойные пакеты, структурированные тетраэдрическими и октаэдрическими формами [19, 20]. Бентонитовая глина Смышляевского месторождения Самарской области была использована в качестве пластификатора для формирования пористого заполнителя. Исследуемый пластификатор выделяется среди других глин высокими параметрами: высокопластичная (число пластичности более 25), высокодисперсная, легкоплавкая, коэффициент вспучивания – более 4. Металлографический

анализ глины показал наличие множества мелких включений, но встречаются и средние размеры (размером 5–10 мкм, рис. 1а), минералогический состав представлен на рис. 2а.

Ферропыль из самораспадающихся шлаков низкоуглеродистого феррохрома

Анализируемая ферропыль в данном исследовании является отходом электрометаллургического производства феррохрома предприятия ферросплавов филиала АО ТНК «Казхром» г. Актобе и пребывает в состоянии пылеобразной формы [9]. Минералогический состав ферропыли представлен на рис. 2б.

В данный период распознаны три вариации модификаций $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$:

1. $\alpha\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ – устойчив в отрезке температур $t = 2130\text{--}1420^\circ\text{C}$.

2. $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ – стабилен в интервале $1420\text{--}675^\circ\text{C}$.

3. $\gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ – устойчив к изменениям при $t \leq 675^\circ\text{C}$.

$\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ нестабилен при 675°C и ниже, но при присутствии незначительного количества Na_2O , K_2O приобретает стабильность при полной утрате тепла, кроме того переход $\beta \rightarrow \gamma$ зависит от скорости охлаждения спека [3, 9, 21]. Две разновидности модификации α и $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, обладают вяжущими характеристиками и могут внедряться в эффективный производственный процесс для получения не только материалов строительного направления, но и огнеупорных изделий. При снижении температуры охлаждения β -модификации образуется третья модификация $\gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, которая имеет устойчивую, стабильную и прочную фазу. Технические показатели фазового состава (минералов) ферропыли представлены в табл. 5.

Таблица 5. Технические показатели фазового состава (минералов), входящих в ферропыль из самораспадающихся шлаков низкоуглеродистого феррохрома
Table 5. Technical indicators of the phase composition (minerals) included in ferro-dust from self-dissolving slags of low-carbon ferrochrome

Минерал (фаза)	Показатели			
	Температура плавления, $^\circ\text{C}$	Плотность, г/см^3	Твердость по шкале Мооса	Микротвердость, кг/мм^2
γ -двухкальциевый силикат $\gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	При 675°C . $\gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ переходит в α	2,97	4,5–5	900–1100
β -двухкальциевый силикат $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Устойчива при температуре более 675°C	3,28	3,5–4,5	800–900
Мервинит $3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$	1580	3,15	6	1250–1350
Оксид хрома Cr_2O_3	2435	3,15	8,5	1900–2000
Диопсид $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	1390	3,25–3,55	5,5–6,0	1150–1200
Магнезиальная шпинель MgAl_2O_4 ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)	2135	4,05	7,5–8	1378–1505

Модификационные видоизменения – расплавленная форма $\leftrightarrow \alpha$, $\alpha \leftrightarrow \alpha'$ и $\alpha' \leftrightarrow \beta$ – обратимые модификации, а трансформации $\beta \rightarrow \gamma$ и $\gamma \rightarrow \alpha'$ следуют исключительно в одном направлении [3, 9, 21].

Существенная неоднородность плотности переход $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ в $\gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ сопровождается ростом объема.

Именно преобразование $\beta \rightarrow \gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ реализует наращивание объемов в интервале 10–12 % и провоцирует в зернах двухкальциевого силиката напряжение, которое разрушает структуру на мелкие зерна. Частицы ферропыли имеют удельную поверхность от 1800 до

2500 $\text{см}^2/\text{г}$, поэтому такие частицы переносятся воздушными потоками на значительные дистанции (более 40 км), которые способствуют деградации верхнего плодородного слоя, накоплению в этом слое химических агрессивных элементов и проникновению их в водный бассейн. В исследованиях [9, 14, 16] было выявлено ускорение процесса твердения жидкостекольной композиции двухкальциевым силикатом благодаря взаимодействию жидкого стекла с известковыми солями.

Такие реакции вызывают появление трудно поддающихся растворению соединений, прежде всего гидросиликатного кальция.

Остальные минералы с их основными показателями приведены в табл. 5.

Способ получения

Композиции, спроектированные для генерации пористого заполнителя, показаны в табл. 6. Для получения образцов выполняется структурирование компонентов в процентном

отношении, где матрицей служит жидкое стекло, коагулированное хлоридом натрия после его дисперсионного раздробления до <1 мм в количестве 3 % [9, 16]. На способ получения пористого заполнителя с использованием жидкостекольной композиции выдан патент [24].

Таблица 6. Составы композиции для производства пористого заполнителя

Table 6. Composition for the production of porous filler

Компоненты	Содержание компонентов, мас. %		
	1	2	3
Жидкое стекло, модифицированное хлоридом натрия	30	20	12
Ферропыль из самораспадающихся шлаков низкоуглеродистого феррохрома	65	73	78
Монтмориллонитовая глина	5	7	10

Способ процесса создания пористых заполнителей рассматривается в последующей цикличности процессов: в смесителе размещалась ферропыль, перемолотая до дисперсных частиц менее 1 мм, коагулированное жидкое стекло хлоридом натрия интегрировалось с ферропылью при функционирующей мешалки тонким ручейком, процесс гомогенизации с временной протяженностью 6–8 мин завершался только тогда, когда достигается однородная консистенция. Сформированный гомогенный продукт сегрегировался в дискретные гранулы комплексом надлежащих ножей. Кон-

струированные гранулы подвергались термической обработке в диапазоне температурных значений 350–400 °С, в результате чего высокопористые частицы расширялись и приобретали очертания, близкие к эллипсообразным (рис. 4а).

Далее эти гранулы, чтобы обеспечить им необходимый уровень роста прочности, подвергались добавочному обжигу в температурных рамках 900–950 °С с изотермической выдержкой 10–15 мин.

Технические особенности пористого заполнителя указаны в табл. 6.



Рис. 4. Макроструктура пористого заполнителя, вид: а – внешний; б – внутренний
Fig. 4. Macrostructure of porous filler, view: a – external; b – internal

Таблица 7. Физико-механические показатели

Table 7. Physical and mechanical properties

Показатель	Состав		
	1	2	3
Прочность на сжатие, МПа	2,91	3,38	3,44
Насыпная плотность, кг/м ³	358	384	425
Огнеупорность, °С	1505	1510	1490
Потери при 5-минутном кипячении, %	0,17	0,19	0,21
Коэффициент размягчения, %	95,0	93,2	91,1
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,198	0,210	0,220

Осуществленные научные изыскания продемонстрировали возможность на матрице из жидкого стекла, наполнителе – ферропыли из самораспадающихся шлаков низкоуглеродистого феррохрома и пластификаторе – монтмориллонитовой глине, получения пористого наполнителя, теплопроводность которого $<0,25 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$.

Приведенные сведения в табл. 6 однозначно демонстрируют, что марки образцов из композиций № 1 и № 2 соответствуют М300, а из композиции № 3 уже М400, т. е. к оптимальным вариантам по марочности следует отнести составы № 1 и № 2.

По одному из важных показателей, например прочности на сжатие, образцы из композиции № 2 значительно опережают образцы из композиции № 1. Таким образом, к предпочтительной (оптимальной) композиции для производства пористого наполнителя надлежит причислить № 2.

Интеграция ферропыли в жидкостекольные композиции в объеме 73 % и монтмориллонитовой глины 8 % становится оптимальной для получения пористого наполнителя. То есть коллоидная матрица жидкостекольной композиции при этом сохраняет свою целостность, что означает, что такой объем наполнителя и пластификатора будет содействовать позитивному эффекту макроструктуры и ее укреплению за счет повышения технических показателей. Если повысить содержание наполнителя и пластификатора (состав № 3), то тогда образец по марочности перейдет в категорию М400, что повысит основной показатель для пористых наполнителей – теплопроводность (табл. 7). Наружное оформление образца, изображенное посредством рисунка (рис. 4а) свидетельствует, что пористость менее заметна, чем во внутренней структуре пористого

заполнителя (рис. 4б). Пористость внутри образца в большей степени представлена замкнутыми порами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Показана высокая надежность прогноза получения на матрице из жидкого стекла, наполнителе – ферропыли из самораспадающихся шлаков низкоуглеродистого феррохрома и пластификаторе – монтмориллонитовой глине пористого наполнителя, теплопроводность которого $<0,25 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$.

2. Представленная научно-исследовательская информация ярко иллюстрирует, что марочность образцов из композиций № 1 и № 2, содержащие ферропыль из самораспадающихся шлаков низкоуглеродистого феррохрома 65 и 73 %, монтмориллонитовая глина 5 и 7 % имеет марочность – М300, т. е. образцы облегченные. Образцы из композиции состава № 3, содержащие ферропыль 78 % и монтмориллонитовой глины – 10 %, имеют повышенную марочность М400, т. е. изделия более увесистые. Если из вышеприведенных сведений провести классифицирование по марочности, тогда к оптимальным составам следует отнести составы № 1 и № 2, но по одному из важных показателей прочности на сжатие образцы из композиции № 2 значительно опережают образцы из композиции № 1, поэтому состав № 2 является оптимальным.

3. Внешнее исследование образца, изображенное посредством рисунка (рис. 4а) показало, что пористость менее заметна, чем во внутренней структуре пористого наполнителя (рис. 4б). Пористость внутри образца в большей степени представлена замкнутыми порами, что способствует получению облегченных пористых наполнителей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Романов П.С., Романова И.П. Рециклинг отходов металлургической промышленности как способ сбережения природных ресурсов и снижения экологической напряженности // Синергия. 2016. № 2. С. 94–99. EDN: WANHWF.
2. Леонтьев Л.И., Пономарев В.И., Шешуков О.Ю. Переработка и утилизация техногенных отходов металлургического производства // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 3. С. 24–27. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-3-24-27>. EDN: VOCMAZ.
3. Кайракбаев А.К., Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Фазовый состав и физико-механические свойства при различных температурах обжига керамического сейсмостойкого кирпича с использованием ферропыли // Стекло и керамика. 2020. № 12. С. 45–50. EDN: BLXJZX.
4. Шаповалов Н.А., Загороднюк Л.Х., Тикунова И.В., Щекина А.Ю., Шкарин А.В. Шлаки металлургического производства – эффективное сырье для получения сухих строительных смесей // Фундаментальные исследования. 2013. № 1-1. С. 167–172. EDN: PVRFZV.
5. Данилова Н.Ю., Алексеев А.В., Шепель А.А. Организация процесса утилизации отходов на предприятиях цветной металлургии // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. Т. 3. № 13. С. 27–29. EDN: YQVYGB.

6. Абдрахимов В.З. Рециклинг межсланцевой глины и шлака от выплавки ферротитана в производстве клинкерного кирпича // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 2. С. 40–49. https://doi.org/10.52409/20731523_2023_2_40. EDN: CYJBBS.
7. Абдрахимов В.З. Получение керамического стенового материала, на основе горелых породы фосфорного шлака без применения природного традиционного сырья // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 400–408. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-400-408>. EDN: DIEVDX.
8. Солонина В.А. Возможности использования промышленных отходов для получения строительной керамики // Архитектура, строительство, транспорт. 2022. № 4. С. 73–81. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2022-4-73-81>. EDN: QGLFZW.
9. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Пористый наполнитель на основе аспирационной пыли от феррохрома и жидкостекольной композиции // Экология промышленного производства. 2023. № 1. С. 2–6. https://doi.org/10.52190/2073-2589_2023_1_2. EDN: MFIEZC.
10. Kairakbaev A.K., Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. The Influence of Ferrous Metallurgy Waste in The Aktobe Region on The Frost Resistance of Ceramic Bricks Based on Low-Melting Clay // Key Engineering Materials. 2021. Vol. 887. P. 453–459. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.453>.
11. Kairakbaev A.K., Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. The Use of Waste from the Processing of Copper-Zinc Concentrates of the East Kazakhstan Region in the Production of Non-Fired Refractory Composites // Key Engineering Materials. 2021. Vol. 887. P. 511–515. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.511>.
12. Kairakbaev A.K., Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Processes in Ceramic Material, Based on Raw Materials with Heightened Fe₂O₃ Content, at Temperatures 950–1050 °C // Glass and Ceramics. 2021. Vol. 78. P. 207–212. <https://doi.org/10.1007/s10717-021-00380-2>.
13. Анпилов С.М., Абдрахимов В.З. Использование золы легкой фракции и межсланцевой глины в производстве сейсмостойкого кирпича // Уголь. 2021. № 4. С. 57–62. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-4-57-62>. EDN: HGJKSR.
14. Kairakbaev A.K., Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov B.Z. The Use of Ash and Slang Material from The Aktobe Thermal Power Plant in The Production of Porous Aggregates Based on Liquid Glass Compositions Contributes to The Development a Green Economy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 919. P. 1–8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/6/062059>.
15. Abdrakhimov B.Z., Abdrakhimova E.S. Oxidation Processes in the Firing of Porous Filltr Based on Oil Production Wastes and Intershale Clay // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2020. Vol. 54. P. 750–755. <https://doi.org/10.1134/S0040579519050026>.
16. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Высокопористый теплоизоляционный материал на основе жидкого стекла // Физика и химия стекла. 2017. Т. 43. № 2. С. 222–230. EDN: YMHQZP.
17. Лотов В.А., Хабибулин Ш.А. Механизм твердения модифицированного жидкостекольного вяжущего и композиционные материалы на его основе // Известия высших учебных заведений. Серия химия и химическая технология. 2015. Т. 58. № 2. С. 46–50. EDN: TRLYZX.
18. Лотов В.А., Хабибулин Ш.А. Применение модифицированного жидкостекольного вяжущего в производстве строительных материалов // Строительные материалы. 2015. № 1. С. 72–75. EDN: TFTVFZ.
19. Абдрахимов В.З. Получение керамических стеновых материалов на основе монтмориллонитовой глины и «хвостов» обогащения полиметаллических руд // Строительство и реконструкция. 2022. № 4. С. 132–138. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-102-4-132-138>. EDN: PYPRRM.
20. Куликов В.А., Ковков И.В., Абдрахимов В.З. Исследование фазового состава керамзита на основе монтмориллонитовой глины и отходов горно-обогатительной фабрики при обогащении угля // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 10. С. 37–42. EDN: OZIDPJ.
21. Абдрахимов В.З. Использование металлургических кальций-, алюминий- и железосодержащих шлаков в производстве жаростойкого бетона на основе ортофосфорной кислоты // Construction and Geotechnics. 2022. Т. 13. № 1. С. 82–95. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2022.1.07>. EDN: BUSCNZ.
22. Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Михеенков М.А., Егиазарьян Д.К., Лобанов Д.А. Стабилизация рафинировочных шлаков путем корректировки их фазового состава и придания им свойств минеральных вяжущих веществ // Новые огнеупоры. 2017. № 6. С. 45–52. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-6-45-52>. EDN: XPWHGP.
23. Александров А.В., Немчинова Н.В. Роль полиморфных модификаций двухкальциевого силиката нефелиновых спеков при производстве глинозема // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 11. С. 170–183. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-11-170-183>. EDN: XEFJIP.
24. Пат. № 2476394, Российская Федерация, C04B 14/24. Способ получения водостойкого пористого наполнителя / В.З. Абдрахимов, В.К. Семенычев, Е.С. Абдрахимова, Е.В. Вдовина; заявитель и патентообладатель Самарская академия государственного и муниципального управления. № 2011126822/03. Заявл. 29.06.2011; опубл. 27.02.2013. Бюл. № 6.

REFERENCES

1. Romanov P.S., Romanova I.P. Metals Industry Waste Recycling As A Way of Preservation of Natural Resources and Reduce Environmental Stress. *Sinergiya*. 2016;2:94-99. (In Russ.). EDN: WANHWF.
2. Leontev L.I., Ponomarev V.I., Sheshukov O.Yu. Processing and Disposal of Industrial Waste from Metallurgical Production. *Ecology and Industry of Russia*. 2016;20(3):24-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-3-24-27>. EDN: VOCMAZ.
3. Kairakbaev A.K., Abdрахимова V.Z., Abdрахимов E.S. The Phase Composition and Physico-Mechanical Properties at Different Temperatures of Ceramic Firing Earthquake-Resistant Bricks Using Ferroli. *Glass and Ceramics*. 2020;12:45-50. (In Russ.). EDN: BLXJZX.
4. Shapovalov N.A., Zagorodnyuk L.K., Tikunova I.V., Schekina A.Y., Shkarin A.V. Slag Metallurgical Production – Effective Feedstock for Dry Mixes. *Fundamental Research*. 2013;1-1:167-172. (In Russ.). EDN: PVRFZV.
5. Danilova N.Y., Alekseev A.V., Shepel A.A. The Organization of the Process of Waste Management on the Enterprises of Nonferrous Metallurgy. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavtiki*. 2017;3(13):27-29. (In Russ.). EDN: YQVYGB.
6. Abdрахимов V.Z. Recycling Of Inter-Shale Clay and Slag from Ferrotitanium Smelting Into Clinker Brick Production. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023;2:40-49. (In Russ.). https://doi.org/10.52409/20731523_2023_2_40. EDN: CYJBBS.
7. Abdрахимов V.Z. Production of Ceramic Wall Material Based On Burnt Rocks and Phosphoric Slag without the Use of Natural Traditional Raw Materials. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):400-408. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-400-408>. EDN: DIEVDX.
8. Solonina V.A. Possibilities of Using Industrial Waste to Produce Structural Ceramics. *Architecture, Construction, Transport*. 2022;4:73-81. (In Russ.). <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2022-4-73-81>. EDN: QGLFW.
9. Abdрахимов V.Z., Abdрахимова E.S. Porous Filler Based On Aspiration Dust from Ferrochrome and Liquid Glass Composition. *Industrial Ecology*. 2023;1:2-6. (In Russ.). https://doi.org/10.52190/2073-2589_2023_1_2. EDN: MFIEZC.
10. Kairakbaev A.K., Abdрахимова E.S., Abdрахимов V.Z. The Influence of Ferrous Metallurgy Waste in The Aktobe Region on The Frost Resistance of Ceramic Bricks Based on Low-Melting Clay. *Key Engineering Materials*. 2021;887:453-459. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.453>.
11. Kairakbaev A.K., Abdрахимова E.S., Abdрахимов V.Z. The Use of Waste from the Processing of Copper-Zinc Concentrates of the East Kazakhstan Region in the Production of Non-Fired Refractory Composites. *Key Engineering Materials*. 2021;887:511–515. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.511>.
12. Kairakbaev A.K., Abdрахимов V.Z., Abdрахимова E.S. Processes in Ceramic Material, Based on Raw Materials with Heightened Fe₂O₃ Content, at Temperatures 950–1050 °C. *Glass and Ceramics*. 2021;78:207-212. <https://doi.org/10.1007/s10717-021-00380-2>.
13. Anpilov S.M., Abdрахимов V.Z. Use of Light Fraction Ash and Inter-Shale Clay in the Production of Earthquake-Resistant Bricks. *Ugol*. 2021;4:57-62. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-4-57-62>. EDN: HGJKSR.
14. Kairakbaev A.K., Abdрахимова E.S., Abdрахимов B.Z. The Use of Ash and Slang Material from The Aktobe Thermal Power Plant in The Production of Porous Aggregates Based on Liquid Glass Compositions Contributes to The Development a Green Economy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;919:1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/6/062059>.
15. Abdрахимов B.Z., Abdрахимова E.S. Oxidation Processes in the Firing of Porous Filltr Based on Oil Production Wastes and Intershale Clay. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2020;54:750-755. <https://doi.org/10.1134/S0040579519050026>.
16. Abdрахимова E.S., Abdрахимов V.Z. Highly Porous Thermal Insulation Material Based on Liquid Glass. *Glass Physics and Chemistry*. 2017;43(2):222-230. (In Russ.). EDN: YMHQZP.
17. Lotov V.A., Khabibulin Sh.A. The Hardening Mechanism of Modified Liquid Glass Binder and Composite Materials Based on It. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2015;58(2):46-50. (In Russ.). EDN: TRLYZX.
18. Lotov V.A., Khabibulin Sh.A. The Use of a Modified Liquid Glass Binder in Production of Building Materials. *Stroitelnye materialy*. 2015;1:72-75. (In Russ.). EDN: TFTVFZ.
19. Abdрахимов V.Z. Production of Ceramic Wall Materials Based On Montmorillonite Clay and “Tailings” Of Polymetallic Ores Enrichment. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya*. 2022;4:132-138. (In Russ.). <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-102-4-132-138>. EDN: PYPRRM.
20. Kulikov V.A., Kovkov I.V., Abdрахимов V.Z. Study of The Phase Composition of Expanded Clay Based on Montmorillonite Clay and Waste from a Mining and Processing Plant During Coal Enrichment. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2010;10:37-42. (In Russ.). EDN: OZIDPJ.

21. Abdrakhimov V.Z. The Use of Metallurgical Calcium, Aluminum and Iron-Containing Slags in the Production of Heat-Resistant Concrete Based on Orthophosphoric Acid. *Construction and Geotechnics*. 2022;13(1):82-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2022.1.07>. EDN: BUSCNZ.
22. Sheshukov O.Yu., Nekrasov I.V., Mikheenkova M.A., Egiazaryan D.K., Lobanov D.A. Refinery Slag Stabilization by Means of Their Phase Composition Correction and Impact to them The Mineral Binding Properties. *New Refractories*. 2017;6:45-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-6-45-52>. EDN: XPWHGP.
23. Aleksandrov A.V., Nemchinova N.V. The Role of Sintered Nepheline Dicalcium Silicate Polymorphs in Alumina Production. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;20(11):170-183. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-11-170-183>. EDN: XEFJIP.
24. Abdrakhimov V.Z., Semenychev V.K., Abdrakhimova E.S., Vdovina E.V. *Method of Obtaining Waterproof Porous Filling Agent*. Patent RF, no. 2476394; 2013. (In Russ.).

Информация об авторах

Анна Вячеславовна Балановская,
к.э.н., доцент, начальник отдела планирования
и контроля цифровой трансформации,
Самарский государственный экономический
университет,
443090, г. Самара, ул. Советской Армии, д. 141,
Россия,
e-mail: balanovskay@mail.ru
Author ID: 267934

Елена Сергеевна Абдрахимова,
к.т.н., доцент,
Самарский университет. Национальный
исследовательский университет
им. академика С.П. Королёва,
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34,
Россия,
✉ e-mail: 3375892@mail.ru
Author ID: 252634

Information about the authors

Anna V. Balanovskaya,
Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor,
Head of the Department of Planning and Control
of Digital Transformation,
Samara State University of Economics,
141 Soviet Army St., Samara 443090,
Russia,
e-mail: balanovskay@mail.ru
Author ID: 267934

Elena S. Abdrakhimova,
Cand. Sci (Eng.), Associate Professor,
Samara University.
(National Research University named
after Academician S.P. Korolev,
34 Moskovskoye Shosse, Samara 443086,
Russia,
✉ e-mail: 3375892@mail.ru
Author ID: 252634

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and ap-proved
by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 21.11.2025.
Одобрена после рецензирования 18.12.2025.
Принята к публикации 12.01.2026.

Information about the article

The article was submitted 21.11.2025.
Approved after reviewing 18.12.2025.
Accepted for publication 12.01.2026.