



УДК 691.33

Е. В. КОРНЕЕВА, канд. техн. наук, доц. кафедры инженерных конструкций, строительных технологий и материалов; **В. А. КОРНЕЕВ**, канд. техн. наук, зав. лабораториями кафедры прикладных информационных технологий и программирования

КОМПОЗИЦИОННОЕ БЕСКЛИНКЕРНОЕ ШЛАКОВОЕ ВЯЖУЩЕЕ НА ТЕХНОГЕННОМ СЫРЬЕ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».

Россия, 654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, зд. 42.

Тел.: (923) 631-93-47; эл. почта: hellen-box-8@yandex.ru

Ключевые слова: металлургические шлаки, прочность, механоактивация, композиционное вяжущее, шлам, удельная поверхность.

Производство вяжущих веществ для строительных технологий одно – из основных направлений при переработке и утилизации техногенных отходов. В статье рассмотрена возможность использования шлаков металлургического производства (электросталеплавильного и доменного гранулированного) в качестве основных компонентов композиционного бесклинкерного вяжущего. Для проявления шлаками вяжущих свойств осуществляется их химическая активация, позволяющая увеличить реакционную способность, физико-химические и механические свойства. В составе вяжущего для разрыхления поверхности обрабатываемого сырья применяется шлам от утилизации отработанных электролитов кислотных аккумуляторов. Его использование обусловлено повышенной активностью и наличием вяжущих свойств (относится к группе ультраосновного сырья). Установлено, что полученное композиционное бесклинкерное шлаковое вяжущее при удельной поверхности 400–450 м²/кг обладает активностью на изгиб до 1,62 МПа и на сжатие до 15,28 МПа, что позволяет рекомендовать его для разработки различных составов строительных смесей.

Введение

Производство бесклинкерных шлаковых вяжущих – продуктов тонкого измельчения различных шлаков с добавками-активаторами (сульфатно-шлаковые, известково-шлаковые, шлако-щелочные) – актуальное научное направление. Использование доменных и сталеплавильных шлаков при получении вяжущих [1–3] способствует реализации концепции «бережливого производства»: экономии природных ресурсов и улучшению экологической обстановки промышленных регионов, а также устойчивому развитию строительной отрасли – повышению рентабельности производства продукции.

В рамках научной гипотезы выдвинуто предположение о том, что комплексная переработка текущих (выпускаемых) шлаков сталеплавильного производства с возможностью разработки составов и технологии получения строительных композиционных материалов различного функционального назначения на его основе исключительно из техногенных продуктов, может быть реализована с помощью механохимической подготовки шлакового сырья, установления механизма структурообразования при формировании бесцементной вяжущей системы. Механохимическая подготовка шлакового сырья с последующим его использованием в композиционных вяжущих различных



классов по прочности, плотности и водонепроницаемости – эффективное технологическое решение, определяющее актуальность данной работы.

С помощью механической активации реализован синтез большого числа соединений:

- в США и на Ближнем Востоке успешно прошли испытание новые геополимерные вяжущие составы, альтернативные портландцементу, получаемые щелочной активацией алюмосиликатного сырья техногенного происхождения. Активация алюмосиликатных материалов щелочным раствором запускает процесс полимеризации, способствуя формированию алюмосиликатной сетки с образованием какой-либо из структур: $[-Si-O-Al-O]$, $[-Si-O-Al-O-Si-O]$ или $[-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O]$. Изучение свойств геополимерного вяжущего показало, что добавка в смесь измельченного гранулированного доменного шлака ускоряет ее схватывание, при этом прочность на сжатие увеличивается [4];

- активация раствором гидроксида натрия различной концентрации гранулированного доменного шлака с добавлением летучей золы способствует образованию бесклинкерного вяжущего в виде щелочно-алюмосиликатного геля, дальнейшее отвердевание которого приводит к образованию прочной и стабильной матрицы [5];

- эффективность щелочной активации доменного шлака также отмечается и в работе ученых Болонского университета [6]. При анализе микроструктуры активированной смеси с заменой природных глин доменным шлаком (60–80 мас. %), богатым кристаллическими фазами, содержащими Са, замечено интенсивное образование различных типов алюмосиликатных гелей с высоким содержанием кальция;

- коллективом ученых факультета металлургии и технологий Университета Черногогория, занимающихся изучением влияния щелочной активации на прочность геополимеров на основе летучей золы, было установлено, что добавление шлака сталеплавильного производства как алюмосиликатного материала, способствует формированию высокополимеризованной структуры, за счет образования аморфного геля алюмосиликата натрия, увеличивая прочность материала [7].

Таким образом, после механической активации металлургических шлаков увеличивается число коагуляционных контактов разнородных частиц, повышается пластическая прочность твердеющего теста, ускоряется образование гидросиликатов кальция и других продуктов гидратации обработанных смесей, прочность изделий из них возрастает в 2–3 раза [8].

Объектом исследования является бесклинкерное композиционное вяжущее на основе активированного шлакового сырья.

Предмет исследования – влияние механохимического синтеза на реакционную способность шлакового сырья.

Цель исследований – разработка безобжигового композиционного шлакового вяжущего, без использования энерго- и ресурсоемкого портландцемента, для применения в производстве строительных материалов.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи**: подбор исходного шлакового сырья с изучением влияния механоактивации на его активность, проектирование композиционного вяжущего, исследование основных его характеристик (прочность на изгиб и на сжатие, нормальная густота, сроки схватывания).



Материалы и методы

Исходные материалы проектируемого композиционного вяжущего: электросталеплавильный шлак Новокузнецкого металлургического комбината, гранулированный доменный шлак Челябинского металлургического комбината и шлам, полученный в результате нейтрализации известью отработанных электролитов кислотных аккумуляторов промышленного транспорта данных предприятий, представляющий собой обводненную гелеобразную массу.

Для большинства промышленных предприятий утилизация образующихся шламовых отходов является серьезной проблемой. Возможность использования их в производстве строительных материалов обусловлена химическим составом, содержащим гипсовые, известково-гипсовые, гипсо-карбонатные, известково-гипсо-карбонатные композиции.

Анализ технической литературы показал, что за счет содержащихся в техногенных шламах $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ они могут быть эффективно использованы как активаторы поверхности и как наполнители цементных систем [9–14]. Образование гидроалюминатов и гидроалюмоферритов кальция, а также других гидратных фаз, близких по составу к продуктам гидратации цементов, способствует формированию активных центров.

Химический состав сырья представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исходных материалов

Элементы, %	Материал		
	Шлак		Шлам
	сталеплавильный (электросталеплавильный)	доменный (гранулированный)	
SiO_2	26,63	39,70	5,24
Al_2O_3	5,35	11,09	1,73
FeO	0,95	0,52	0,19
MnO	0,37	0,35	0,14
CaO	55,55	41,13	27,10
в т.ч. $\text{CaO}_{\text{своб.}}$	0,71	-	-
MgO	9,68	6,72	2,71
TiO_2	-	0,49	-
Na_2O	-	-	0,06
P_2O_5	0,03	-	0,37
S	1,41	-	62,37
ZnO	-	-	1,40
Cr_2O_3	0,05	-	-

Состав вяжущего рассчитывался по коэффициентам основности сырья [15]: Сырье с $K_{\text{осн.}} > 1$ (сталеплавильный шлак) / Сырье с $K_{\text{осн.}} < 1$ (доменный гранулированный шлак). Расчет позволил по валовому химическому составу определить возможность использования данного сырья, рассчитать основность силикатов и состав вяжущего.

Для увеличения реакционной способности, улучшения физико-химических и механических свойств электросталеплавильный и гранулированный доменный шлаки подвергались сухому измельчению в планетарной мельнице-активаторе АГО-3. Разрушение кристаллической решетки минералов позволило освободить



накопленную в ней внутреннюю энергию, что привело к образованию межфазной поверхности, необходимой для реализации химического взаимодействия, способствуя увеличению вяжущих свойств смеси. Совместный помол способствовал связыванию свободного оксида кальция СаОсвоб. (из электросталеплавильного шлака) с микрокремнеземом (из доменного шлака), также увеличивая реакционную способность компонентов.

Полученную смесь затворяли шламом, с отношением шлам/шихта 0,37, тщательно перемешивали и укладывали в форму для образцов-кубов со стороной 7,07 см.

Использование шлама в составе вяжущего обусловлено его повышенной активностью и наличием вяжущих свойств (относится к группе ультраосновного сырья – модуль основности $M_o > 3$).

Образцы выдерживались в естественных условиях при температуре $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $(95 \pm 5)\%$, ГОСТ 310.4-81*. Испытания проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 310.2, ГОСТ 310.3, ГОСТ 310.4.

Результаты исследования

Таким образом, путем совместного тонкого измельчения металлургических шлаков: электросталеплавильного и гранулированного доменного с добавлением активатора поверхности – шлама, полученного в результате нейтрализации известью отработанных электролитов кислотных аккумуляторов промышленного транспорта, создано безобжиговое гидравлическое известково-шлаковое вяжущее. Состав и основные характеристики вяжущего представлены в табл. 2.

Таблица 2

Состав и основные характеристики вяжущего

Характеристики вяжущего		Ед. изм.	Свойства
Марка		кг/см ²	150
Состав вяжущего:	Шлак сталеплавильный (электросталеплавильный)	%	72–74
	Шлак доменный (гранулированный)	%	18–20
	Шлам	%	8–9
Растекаемость (осадка конуса)		см	15,3
Начало схватывания		мин.	25–30
Конец схватывания		час.	4–8
Прочность при естественном твердении 28 суток:			
– при растяжении на изгиб:		МПа	1,60–1,62
– при сжатии:		МПа	15,15–15,28

Известно, что активность вяжущего определяется не только химическим и минералогическим составом сырьевых продуктов, но и тонкостью помола, позволяя улучшить свойства конечного продукта, так как более мелкая дисперсность всех компонентов вяжущего обеспечивает их реакционную способность [16].

Измельчение в мельнице осуществляется в поле трех инерционных сил: двух центробежных и силы Кориолиса, благодаря чему энергонапряженность лабораторной планетарной мельницы АГО-3 превосходит энергонапряженность гравитационных шаровых мельниц на 2–3 порядка. За счет этого в процессе измельчения произошло разрушение кристаллической решетки минералов,



составляющих шлак, изменение прочности химических связей от напряжения и деформации до полного их разрыва.

Было установлено, что совместный помол оптимален до достижения удельной поверхности 400–450 м²/кг в течение 10–12 мин. При помоле свыше 450 м²/кг прочность вяжущего снижается. Это объясняется тем, что в кристаллических решетках минералов измельчаемых материалов возникают достаточно большие внутренние напряжения, способствующие появлению трещин. При помоле ниже 400 м²/кг также прочность снижается, так как для механохимического синтеза площадь контакта между реагирующими твердыми фазами недостаточна (табл. 3), а также сохраняется высокое содержание СаОсвоб. в смеси. При недостаточной удельной поверхности измельчаемых компонентов содержание СаОсвоб. находится преимущественно в закрытом состоянии (в алюмосиликатной оболочке), что препятствует его гидратации при наборе прочности.

Таблица 3

Результаты испытаний составов при различном соотношении компонентов вяжущего

Вещественный состав вяжущего, % по массе			Удельная поверхность измельчаемых шлаков, м²/кг	Прочность при естественном твердении 28 суток, МПа	
Шлак		Шлам		при сжатии	при растяжении на изгиб
Сталеплавильный	Доменный				
72	20	8	300	13,29	1,39
73	18	9	350	14,57	1,53
72	19	9	400	15,28	1,62
74	18	8	450	15,15	1,60
74	18	8	500	14.29	1.51

Твердение полученного бесклнкерного минерально-шлакового вяжущего обусловлено активацией шлака ионами кальция (Са²⁺), гидроксид-ионами (ОН⁻) и сульфат-ионами (SO₄²⁻) с образованием:

– СаSO₄·2H₂O при замещении ионов свинца (в сульфате свинца шлама) на ионы кальция (свободного оксида кальция электросталеплавильного шлака);

– Са₂SiO₄ при взаимодействии свободного оксида кальция сталеплавильного шлака с аморфным кремнеземом, преобладающим в составе доменного гранулированного шлака.

Известь действует как щелочной возбудитель алюминатов и силикатов шлака, способствуя их гидратации с образованием на более поздних этапах твердения гидроалюминатов СаО·Al₂O₃·СаSO₄·H₂O; а затем и гидросиликатов кальция Са₂SiO₄·H₂O.

При определении равномерности изменения объема на лицевой поверхности образцов трещин и искривлений не обнаружено. Водостойкость вяжущего обусловлена повышенной температурой при измельчении в планетарной мельнице. Также уменьшение растворимости в воде сульфата кальция и создание условий образования нерастворимых соединений, защищающих дигидрат



сульфата кальция, достигается наличием в составе вяжущего гидравлического компонента – извести [17].

Заключение

На основании проведенного исследования установлена эффективность механохимического синтеза при переработке шлаковых отходов, что указывает на возможность их применения в составе вяжущего. Новизна предлагаемого решения подтверждена патентом Российской Федерации [18].

Перспективность практического использования полученного вяжущего обусловлена низкой энергоемкостью его производства в сравнении с цементом, что позволяет рекомендовать его для приготовления строительных смесей различного функционального назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mechanochemical Activation of Basic Oxygen Furnace Slag: Insights into Particle Modification, Hydration Behavior, and Microstructural Development / Maochun Xu, Liuchao Guo, Junshan Wen [et al.] // *Materials*. – 2025. – Vol. 18, № 15. – Art. 3687. – DOI 10.3390/ma18153687.
2. Zhang, Shaofeng. Hydration and mechanical properties of cement-steel slag system incorporating different activators / Shaofeng Zhang, Ditao Niu // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 363. – Art. 129981.
3. Лунев, А. А. Получение геополимерного вяжущего гибридного состава на основе побочных продуктов теплоэнергетики и металлургии / А. А. Лунев, Д. О. Шульц, А. В. Довыденко // *Умные композиты в строительстве*. – 2022. – Т. 3, № 4. – С. 18–27. – DOI 10.52957/27821919_2022_4_18.
4. Saha, S. Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag / S. Saha, C. Rajasekaran // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 146. – P. 615–620.
5. Ravikumar, D. Structure and strength of NaOH activated concretes containing fly ash or GGBFS as the sole binder / D. Ravikumar, S. Peethamparan, N. Neithalath // *Cement and Concrete Composites*. – 2010. – Vol. 32, № 6. – P. 399–410.
6. Bignozzi, M. C. Mix-design and characterization of alkali activated materials based on metakaolin and ladle slag / M. C. Bignozzi, S. Manzi, I. Lancellotti [et al.] // *Applied Clay Science*. – 2013. – Vol. 73. – P. 78–85.
7. Modification of mechanical and thermal properties of fly ash-based geopolymer by the incorporation of steel slag / Irena Nikolić, Smilja Marković, Ivona Janković-Častvan [et al.] // *Materials Letters*. – 2016. – Vol. 176. – P. 301–305.
8. Шоева, Т. А. Механохимическое получение смешанного вяжущего / Т. А. Шоева, Ю. Д. Каминский // *Материалы XV академических чтений РААСН : Международная научно-техническая конференция «Достижения и проблемы материаловедения и модернизации строительной индустрии»*. – Казань, 2010. – Т. 1. – С. 181–183.
9. Utilizing Industrial Sludge Ash in Brick Manufacturing and Quality Improvement / Yu-Ming Huang, Chao-Shi Chen, Chen-Chung Chen, Jian-Wen Lai // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, № 11. – Art. 2568. – DOI 10.3390/ma17112568.
10. Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review / Laine B. Pereira, Cristina M. S. Sad, Eustáquio V. R. Castro [et al.] // *Fuel*. – 2022. – Vol. 310, Part B. – Art. 122301.
11. Utilization of Sewage Sludge in the Sustainable Manufacturing of Ceramic Bricks / Kairat Ospanov, Dariusz Andraka, Elmira Kuldeeva, Issatay Munussov // *Sustainability*. — 2025. – Vol. 17, № 14. – Art. 6431. – DOI 10.3390/su17146431.



12. Smirnova, O. E. Application of surface wastewater sludge in the production of composite building materials / O. E. Smirnova, A. V. Krasova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 962. — Art. 022028. — DOI 10.1088/1757-899X/962/2/022028.

13. Recycling drinking water treatment sludge in construction and building materials: A review / Zhi-Hai He, Bin Wang, Jin-Yan Shi [et al.] // Science of the Total Environment. — 2024. — Art. 171513. — DOI 10.1016/j.scitotenv.

14. Корнеева, Е. В. Техногенные шламовые отходы промышленности в производстве строительных материалов / Е. В. Корнеева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 10. – С. 99–111.

15. Боженков, П. И. Комплексное использование минерального сырья и экология / П. И. Боженков. – Москва : АСВ, 1994. – 264 с. – ISBN 5-87829-004-9.

16. Корнеева, Е. В. Механохимическая активация сталеплавленного шлака для получения бесцементного композиционного вяжущего / Е. В. Корнеева // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2024. – Т. 51, № 1. – С. 193–199.

17. Binders from gypsum-containing waste and products based on them / Nataliya Alfimova, S. Yu. Pirieva, M. Yu. Elistratkin, I. S. Nikulin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 945, № 1. – Art. 012057. – DOI 10.1088/1757-899X/945/1/012057.

18. Патент № 2851913 Российская Федерация. Бесцементное вяжущее : заявка № 2025107339 / Е. В. Корнеева ; заявитель и патентообладатель Е. В. Корнеева. – заявл. 27.03.2025 ; опубл. 01.12.2025, Бюл. № 34.

KORNEEVA Elena Viktorovna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of engineering structures, construction technologies and materials; KORNEEV Viktor Aleksandrovich, candidate of technical sciences, head of laboratories of the chair of applied information technologies and programming

COMPOSITE CLINKER-FREE SLAG BINDER BASED ON MAN-MADE RAW MATERIALS

Siberian State Industrial University.

42, Kirova St., Novokuznetsk, 654007, Russia.

Tel.: (923) 631-93-47; email: hellen-box-8@yandex.ru

Key words: metallurgical slags, strength, mechanical activation, composite binder, sludge, specific surface area.

The production of binders for construction technologies is one of the main areas in the processing and disposal of industrial waste. This article examines the potential use of metallurgical slags (electric steelmaking and granulated blast furnace slags) as the main components of a composite clinker-free binder. To enhance the slag's binding properties, chemical activation enhances its reactivity and improves its physicochemical and mechanical properties. Sludge from the disposal of spent battery electrolytes is used as a binder to loosen the surface of the processed material. Its use is due to its increased activity and astringent properties (it belongs to the ultrabasic group of raw materials). It was established that the obtained composite clinker-free slag binder with a specific surface area 400–450 m²/kg, has a flexural strength of up to 15,28 MPa and a compressive strength of up to 1,62 MPa, which allows it to be recommended for the development of various construction mixture compositions.



REFERENCES

1. Xu M., Guo L., Wen J. [et al.]. Mechanochemical Activation of Basic Oxygen Furnace Slag: Insights into Particle Modification, Hydration Behavior, and Microstructural Development. *Materials*. 2025, Vol. 18, No. 15, Art. 3687. DOI 10.3390/ma18153687.
2. Zhang S., Niu D. Hydration and mechanical properties of cement-steel slag system incorporating different activators. *Construction and Building Materials*. 2023, Vol. 363, Art. 129981.
3. Lunev A. A., Shults D. O., Dovydenko A. V. Poluchenie geopolimernogo vyazhushchego gibridnogo sostava na osnove poboch'nykh produktov teploenergetiki i metallurgii [Production of a hybrid geopolymer binder based on by-products of thermal power engineering and metallurgy]. *Umnnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composites in Construction]*. 2022, Vol. 3, № 4, P. 18–27. DOI 10.52957/27821919_2022_4_18.
4. Saha S., Rajasekaran C. Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*. 2017, Vol. 146, P. 615–620.
5. Ravikumar D., Peethamparan S., Neithalath N. Structure and strength of NaOH activated concretes containing fly ash or GGBFS as the sole binder. *Cement and Concrete Composites*. 2010, Vol. 32, No. 6, P. 399–410.
6. Bignozzi M. C., Manzi S., Lancellotti I. [et al.]. Mix-design and characterization of alkali activated materials based on metakaolin and ladle slag. *Applied Clay Science*. 2013, Vol. 73, P. 78–85.
7. Nikolić I., Marković S., Janković-Častvan I. [et al.]. Modification of mechanical and thermal properties of fly ash-based geopolymer by the incorporation of steel slag. *Materials Letters*. 2016, Vol. 176, P. 301–305.
8. Shoeva T. A., Kaminskiy Yu. D. Mekhanokhimicheskoe poluchenie smeshannogo vyazhushchego [Mechanochemical production of a mixed binder]. *Materialy XV akademicheskikh chteniy RAASN : Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Dostizheniya i problemy materialovedeniya i modernizatsii stroitel'noy industrii» [Achievements and problems of materials science and modernization of the construction industry]*. Kazan, 2010, Vol. 1, P. 181–183.
9. Huang Y.-M., Chen C.-S., Chen C.-C., Lai J.-W. Utilizing Industrial Sludge Ash in Brick Manufacturing and Quality Improvement. *Materials*. 2024, Vol. 17, No. 11, Art. 2568. DOI 10.3390/ma17112568.
10. Pereira L. B., Sad C. M. S., Castro E. V. R. [et al.]. Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review. *Fuel*. 2022, Vol. 310, Part B, Art. 122301.
11. Ospanov K., Andraka D., Kuldeeva E., Munussov I. Utilization of Sewage Sludge in the Sustainable Manufacturing of Ceramic Bricks. *Sustainability*. 2025, Vol. 17, No. 14, Art. 6431. DOI 10.3390/su17146431.
12. Smirnova O. E., Krasova A. V. Application of surface wastewater sludge in the production of composite building materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, Vol. 962, Art. 022028. DOI 10.1088/1757-899X/962/2/022028.
13. He Z.-H., Wang B., Shi J.-Y. [et al.]. Recycling drinking water treatment sludge in construction and building materials: A review. *Science of the Total Environment*. 2024, Art. 171513. DOI 10.1016/j.scitotenv.
14. Korneeva E. V. Tekhnogennyye shlamovyye otkhody promyshlennosti v proizvodstve stroitel'nykh materialov [Industrial sludge waste in the production of building materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo [News of higher educational institutions. Construction]*. 2024, № 10, P. 99–111.



15. Bozhenov P. I. Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syrya i ekologiya [Comprehensive use of mineral raw materials and ecology]. Moscow, ASV, 1994, 264 p. ISBN 5-87829-004-9.

16. Korneeva E. V. Mekhanokhimicheskaya aktivatsiya staleplavilnogo shlaka dlya polucheniya bestsementnogo kompozitsionnogo vyazhushchego [Mechanochemical activation of steelmaking slag to obtain a cementless composite binder]. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences]. 2024, Vol. 51, № 1, P. 193–199.

17. Alfimova N., Pirieva S. Yu., Elistratkin M. Yu., Nikulin I. S. Binders from gypsum-containing waste and products based on them. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, Vol. 945, No. 1, Art. 012057. DOI 10.1088/1757-899X/945/1/012057.

18. Patent № 2851913 Rossiyskaya Federatsiya. Bestsementnoe vyazhushchee [Cementless binder] : zayavka № 2025107339 / E. V. Korneeva ; zayavitel i patentoobladatel E. V. Korneeva. – zayavl. 27.03.2025 ; opubl. 01.12.2025, Byul. № 34.

©Е. В. Корнеева, В. А. Корнеев, 2026

Получено: 20.04.2026 г.