

Оригинальная статья

УДК 669.054.82

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-2(56)-89-96

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДОМЕННОГО ШЛАКА И ШЛАМА
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛИМЕРНО-МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ**

© 2026 г. Е. Г. Чумачкова, И. И. Чумачков, С. В. Фейлер

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Провели исследование по модифицированию полимерно-минеральных композитов на основе вторичных полиолефинов с мусорных полигонов и добавкой песка в виде металлургических отходов. Рассмотрели возможность использования доменного шлака и высушенного доменного шлама в качестве частичной и полной замены песка при фиксированном соотношении полимерной матрицы и минерального наполнителя. В качестве полимерной матрицы использовали смесь полиэтиленов высокого и низкого давления. Рассмотрены особенности технологии переработки, включающей стадии пластификации, гранулирования, повторной гомогенизации и последующего прессования. Это обеспечивало более равномерное распределение минеральной фазы в объеме композита. Оценили влияние соотношения песка и шлако-шламовой смеси на прочность при сжатии образцов. Установили, что при увеличении доли металлургических компонентов в составе наполнителя максимальное напряжение при сжатии возрастает с 25,21 до 28,87 МПа. Полученный результат указывает на положительное влияние шлако-шламовой смеси на прочностные свойства композита в исследованных условиях. Показано, что доменные шлак и шлам могут рассматриваться не только как замена части природного минерального сырья, но и как функциональная минеральная фаза в составе полимерно-минеральных композитов. Полученные данные позволяют рассматривать совместное использование вторичных полиолефинов и металлургических отходов как одно из перспективных направлений утилизации промышленных и бытовых отходов. Результаты подтверждают целесообразность дальнейших исследований таких композитов применительно к производству маслобензостойких плит и элементов дорожных покрытий, не несущих конструктивных нагрузок.

Ключевые слова: композиты, пластик, шлак, шлам, прочность, прессование, переработка, металлургия

Финансирование. Исследование выполнено за счет средств ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», номер госрегистрации 125121914748-3 от 19 декабря 2025 г.

Для цитирования: Чумачкова Е.Г., Чумачков И.И., Фейлер С.В. Ресурсосберегающая переработка доменного шлака и шлама при производстве полимерно-минеральных композитов. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;2(56):89–96. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2\(56\)-89-96](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2(56)-89-96)

Original article

**RESOURCE-SAVING PROCESSING OF BLAST FURNACE SLAG AND SLUDGE IN
THE PRODUCTION OF POLYMER-MINERAL COMPOSITES**

© 2026 E. G. Chumachkova, I. I. Chumachkov, S. V. Feiler

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. A study was conducted on the modification of polymer-mineral composites based on secondary polyolefins from landfills and the addition of sand in the form of metallurgical waste. The possibility of using blast furnace sludge and dried blast furnace sludge as a partial and complete replacement for sand with a fixed ratio of polymer matrix and mineral filler was considered. A mixture of high- and low-pressure polyethylene was used as the

polymer matrix. The features of the processing technology, including the stages of plasticization, granulation, re-homogenization and subsequent pressing, are considered. This ensured a more uniform distribution of the mineral phase in the volume of the composite. The effect of the ratio of sand and slag-slurry mixture on the compressive strength of the samples was evaluated. It was found that with an increase in the proportion of metallurgical components in the filler, the maximum compressive stress increases from 25.21 to 28.87 MPa. The obtained result indicates the positive effect of the slag-slurry mixture on the strength properties of the composite under the studied conditions. It is shown that blast furnace slag and sludge can be considered not only as a substitute for a part of natural mineral raw materials, but also as a functional mineral phase in the composition of polymer-mineral composites. The data obtained allow us to consider the joint use of secondary polyolefins and metallurgical waste as one of the promising areas for the disposal of industrial and household waste. The results confirm the expediency of further studies of such composites in relation to the production of oil- and gasoline-resistant plates and road surface elements that do not carry structural loads.

Keywords: Composites, plastic, slag, sludge, strength, pressing, processing, metallurgy

Funding. The study was carried out at the expense of the Siberian State Industrial University, state registration number 125121914748-3 dated December 19, 2025.

For citation: Chumachkova E.G., Chumachkov I.I., Feiler S.V. Resource-saving processing of blast furnace slag and sludge in the production of polymer-mineral composites. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;2(56):89–96. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2\(56\)-89-96](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-2(56)-89-96)

Введение

В мире наблюдается накопление пластиковых отходов. Их объем продолжает расти [1]. Одной из активно обсуждаемых научных тем остается утечка микропластика [4]. Технологии обращения с пластиковыми отходами включают механическую и химическую переработки, а также утилизацию сжиганием с выработкой полезной энергии [2]. Механическая переработка лидирует по доле применения, но требует предварительной сортировки, мойки и сушки [2]. При мойке измельченного сырья в систему водоотведения попадает микропластик [4].

Для полиолефинов к альтернативным подходам утилизации допустимо отнести их смешивание с упрочняющей минеральной фазой с образованием полимерно-наполненного композита [7]. Одним из известных примеров является полимерно-песчаный материал [6]. Изделия на основе песка и пластика применяют для изготовления плит, брусчатки и других элементов дорожных покрытий [17]. Такие материалы способны обеспечивать удовлетворительный уровень прочности и могут рассматриваться как альтернатива традиционным строительным изделиям в ряде областей применения [16].

Ключевыми факторами, влияющими на свойства полимерно-песчаных композитов, являются дисперсность наполнителя, форма частиц и наличие в нем сторонних примесей [6]. Для таких материалов распространенным наполнителем является чистый речной песок [6]. Он обеспечивает удовлетворительную текучесть расплава и его обво-

лакивание полимером. Песок в качестве наполнителя упрощает введение пигментов и способствует повышению прочности готового изделия. В ряде регионов доступность качественного речного песка ограничена логистическими и геологическими факторами. Также производство бетонных изделий или дорожных покрытий сопровождается дополнительными издержками. Для промышленных площадок и горнорудных активов при этом представляют интерес плиты, устойчивые к маслам и бензину. Полиолефины, в том числе полиэтилен высокого и низкого давления, а также полипропилен, в целом химически инертны к углеводородам, что позволяет рассматривать их в качестве матрицы для наполненных полимерных композитов [7].

Наблюдается избыточное накопление металлургических отходов, которые могут рассматриваться как потенциальная альтернатива природному речному песку [8]. В металлургическом производстве приоритетным направлением обращения с железосодержащими пылями и шламами остается их возврат в технологический цикл через агломерацию, окускование, выщелачивание или металлизацию [8]. Однако для доменных шламов такой подход ограничен высоким содержанием цинка и щелочных элементов, а также тонкодисперсным составом [9]. Эти факторы затрудняют стабильный возврат материала в доменную печь и являются ключевыми причинами, сдерживающими прямой рециклинг подобных отходов в основном металлургическом переделе [9].

В связи с этим представляет практический интерес поиск направлений утилизации доменного шлака и шлама, не требующих полного удаления сопутствующих компонентов и позволяющих использовать их минеральную фазу в качестве функционального наполнителя [8].

При производстве чугуна образуется побочный продукт (доменный шлак), являющийся одним из наиболее изученных минеральных материалов [12]. Его состав характеризуется высоким содержанием оксидов кальция, кремния и алюминия, что позволяет рассматривать его как минеральный компонент для бетонов и дорожных смесей [12]. С позиции рационального использования природных ресурсов и развития рециклинга целесообразно изучить возможность частичной или полной замены природного песка металлургическими отходами при условии подтверждения их эффективности механическими испытаниями [14].

Накопленный объем исследований демонстрирует значительный потенциал доменных шлаков в строительных композициях [12]. Однако их применение в полимерных матрицах остается изученным существенно слабее [20]. Это формирует научный и практический интерес к оценке шлака не только как добавки в цементные системы, но и как наполнителя в полимерно-минеральных композитах.

Исследования показывают, что прочность полимерно-наполненных композитов зависит от фракционного состава, формы частиц и адгезии на границе раздела [17]. Прочность плит при оптимальном соотношении пластик – песок достигает допустимого уровня для эксплуатации рассматриваемых изделий в дорожных покрытиях [17].

В полимерно-песчаных композитах часто применяется смесь полиэтиленов высокого и низкого давления с полипропиленом в качестве полимерного связующего [7]. Прессованные пластиковые отходы, отобранные на этапе сортировки на мусорных полигонах, являются одними из самых доступных и часто применяемых вариантов сырья для подобных материалов [16]. Отдельно следует отметить устойчивость полиолефинов к маслам и щелочам, а также необходимость добавок для повышения межфазной адгезии [7]. Область полимерно-песчаных и полимерно-минеральных материалов развивается достаточно активно [6]. Вместе с тем основной массив публикаций сосредоточен на лабораторных механических характеристиках образцов, тогда как экономические аспекты внедрения, устойчивость технологии к изменчивости сырья и производственные ограничения описаны значительно слабее [6]. Свойства таких материалов существенно зависят от типа полиолефиновой

матрицы, содержания наполнителя, дисперсности минеральной фазы, температуры переработки и режима формования [6].

Следует отметить задачу получения воспроизводимости результата при переработке смесевых пластиков и минерального сырья переменного состава. Особый интерес представляет оценка составов, в которых в качестве минеральной фазы используются побочные продукты металлургического производства [8].

Для полимерных систем с металлургической минеральной фазой показана техническая реализуемость получения композитов на основе термопластов [19]. Для HDPE-композитов с металлургическим шлаком также продемонстрирована возможность получения работоспособной структуры материала [20]. В исследованиях по получению искусственного камня с использованием доменной пыли показана возможность формирования плотной композиционной структуры [18]. Металлургические минеральные отходы рассматриваются как перспективные функциональные наполнители для материалов смежных отраслей [8].

В то же время систематизированных данных по использованию гранулированного доменного шлака и высушенного доменного шлама в смеси со вторичными полиолефинами немного. Это делает актуальным исследование не только механических характеристик таких композитов, но и технологической допустимости их формования.

Технико-экономическая эффективность полимерно-минеральных композитов связана с возможностью вовлечения металлургических отходов вместо части природного песка, что одновременно позволяет расширить направления переработки пластика и снизить потребность в традиционном минеральном наполнителе [8]. Такие материалы потенциально пригодны для эксплуатации в условиях возможного контакта с нефтепродуктами [7].

Цель работы – оценка влияния добавок доменного шлака и шлама на прочностные свойства полимерно-минеральных композитов на основе вторичных полиолефинов, а также обоснование возможности их использования как ресурсоэффективного направления утилизации металлургических отходов.

Методы и принципы исследования

В настоящей работе исследовали полимерно-минеральные композиты при соотношении 30 % пластика и 70 % наполнителя. В качестве полимерной матрицы использовали смесь полиэтиленов высокого и низкого давления (ПВД и ПНД) в равных пропорциях.

В качестве наполнителя использовали строи-

тельный песок, а также доменный шлак, гранулированный для производства цементов в соответствии с ГОСТ 3476 – 2019, и шлам, образующийся после мокрой очистки доменного газа.

Применяли доменный шлак со следующим химическим составом: 41,54 % CaO; 7,48 % MgO; 36,94 % SiO₂; 9,8 % Al₂O₃; 0,22 MnO %; 0,45 % TiO₂; 0,01 % хлоридов.

Химический состав доменного шлама включает следующие компоненты: 39,1 % Fe; 0,28 %, S; 4,26 % CaO; 5,4 % SiO₂; 1,92 %, MgO; 0,14 %, Mn; 0,026 % P; 1,75 % Al₂O₃. Также присутствуют оксиды щелочных металлов: 0,4 % Na₂O и 0,27 % K₂O. Массовая доля оксида цинка (ZnO) составляет 4,47 %, оксида титана (TiO₂) – 0,32 %.

Перед смешиванием доменный шлак и строительный песок просеивали через сито с размером ячеек 1 мм.

Проведена оценка влияния добавок доменного шлама и шлама на прочность наполненного полимерного композита. Суммарная масса смеси для производства одного образца, учитывая необходимость удаления краевой зоны, составляла 100 г. Для каждого опытного состава готовили три смеси и получали из них по одному образцу. Во всех составах массовое соотношение полимерной матрицы к наполнителю составляло 30/70. Полимерная матрица включала ПНД и ПВД в равных долях (15/15). Варьировали соотношение компонентов минерального наполнителя (доменный шлак и шлам, песок). Массовый состав экспериментальных смесей приведен в табл. 1.

Температуру в зонах пластификации, гомогенизации и дозирования лабораторного плавления-нагревательного агрегата (АПН) устанавливали 180, 205 и 200 °С.

Исходные компоненты загружали в бункер АПН и пропускали полученный состав через фильеру с пятью отверстиями диаметром 4 мм,

нарезая смесь на гранулы размером примерно 5 × 5 × 5 мм. После тщательного перемешивания гранулы повторно загружали в агрегат, получая гомогенизированную смесь диаметром 15 мм. Удалив краевые зоны, массу укладывали в пресс-форму с внутренним диаметром 20,65 мм, предварительно нагретую до 80 °С, и прессовали усилием до 10 т с выдержкой 3 мин. Торцы образцов обрабатывали алмазным диском без воды до плоско-параллельности и длины 15 мм.

Образцы испытывали на сжатие на универсальной испытательной машине SUBRAMAX PMBC-50-A-1-02 без использования экстензометра, контролируя деформацию по перемещению подвижной траверсы. Размеры образцов измеряли с помощью электронного штангенциркуля. Скорость перемещения траверсы задавали 3 мм/мин до достижения 100 Н на тензодатчике и далее 1 мм/мин до достижения фиксированной деформации, равной 25 % для всех образцов. Между плитами машины и образцами смазка или подложка для снижения трения отсутствовали.

Результаты испытаний цилиндрических образцов с фиксированным массовым соотношением полимеров и наполнителя, но разным массовым соотношением металлургических отходов и песка, и высота образцов представлены в табл. 2 и на рисунке, диаметр всех образцов составлял 20,65 мм.

Основные результаты

В исследованной серии образцов с увеличением содержания металлургических отходов наблюдается повышение прочности полимерно-минеральных композитов.

Заметное повышение прочности материала наблюдается при увеличении содержания шлако-шламовой смеси свыше 60 % и снижении доли песка менее 40 %. Максимальная прочность достигнута для состава без добавления песка, полностью состоящего из шлако-шламовой смеси.

Т а б л и ц а 1

Массовый состав экспериментальных полимер-минеральных композитов

Table 1. Mass composition of experimental polymer-mineral composites

Процентное соотношение наполнителей (шлак + шлам/песок), %	Массовое соотношение наполнителей, г		
	Доменный шлак	Доменный шлам	Песок
50/50	33,25	1,75	35
60/40	39,9	2,1	28
70/30	46,55	2,45	21
80/20	53,2	2,8	14
90/10	59,85	3,15	7
100/0	66,5	3,5	0

Результаты испытаний

Table 2. Test results

Предел прочности при сжатии, МПа	Длина образца, мм	Соотношение наполнителей (шлак + шлам/ песок), %	Массовое соотношение наполнителя, г		
			доменный шлак	доменный шлам	песок
25,20968	15,70	50/50	33,25	1,75	35,00
25,46647	15,50	60/40	39,90	2,10	28,00
26,61005	15,50	70/30	46,55	2,45	21,00
28,40158	15,08	80/20	53,20	2,80	14,00
28,66732	15,21	90/10	59,85	3,15	7,00
28,87077	15,94	100/0	66,50	3,50	0

В первой экспериментальной серии прочность при сжатии монотонно возрастает от 25,21 МПа при содержании 50 % металлургических отходов и 50 % песка до 28,87 МПа при 100 % шлако-шламовой смеси. Прирост составляет приблизительно 3,66 МПа (примерно 14 – 15 %). При содержании 90 – 100 % металлургических отходов в наполнителе рост прочности замедляется (от 28,67 до 28,87 МПа). Учитывая соотношение высоты образца к его диаметру порядка 0,75 и отсутствия в ходе испытаний антифрикционных мер, реальные значения могли отличаться из-за трения на торцах.

Выводы

При фиксированном массовом соотношении 30 % полимерной матрицы к 70 % наполнителя, а также при использовании смеси полиэтиленов высокого и низкого давления в равных пропорциях, увеличение доли шлако-шламовой смеси в составе наполнителя в условиях настоящего эксперимента сопровождается ростом прочности при сжатии с 25,21 до 28,87 МПа. Наиболее заметное повышение прочности наблюдается при содержании металлургических отходов свыше 70 % в составе наполнителя, тогда как в интервале 90 – 100 % шлако-шламовой смеси прирост прочности замедляется.

Полученные результаты относятся к рассматриваемой серии составов, включающей конкретную полимерную матрицу, конкретный гранулометрический состав наполнителей и заданный режим формования. В связи с этим выявленный положительный эффект не следует автоматически распространять на все полимерно-минеральные композиты со шлаком и шламом без дополнительной экспериментальной проверки. Результаты подтверждают принципиальную возможность использования доменного шлака и шлама в качестве минеральной фазы полимерно-минеральных композитов на основе вторичных

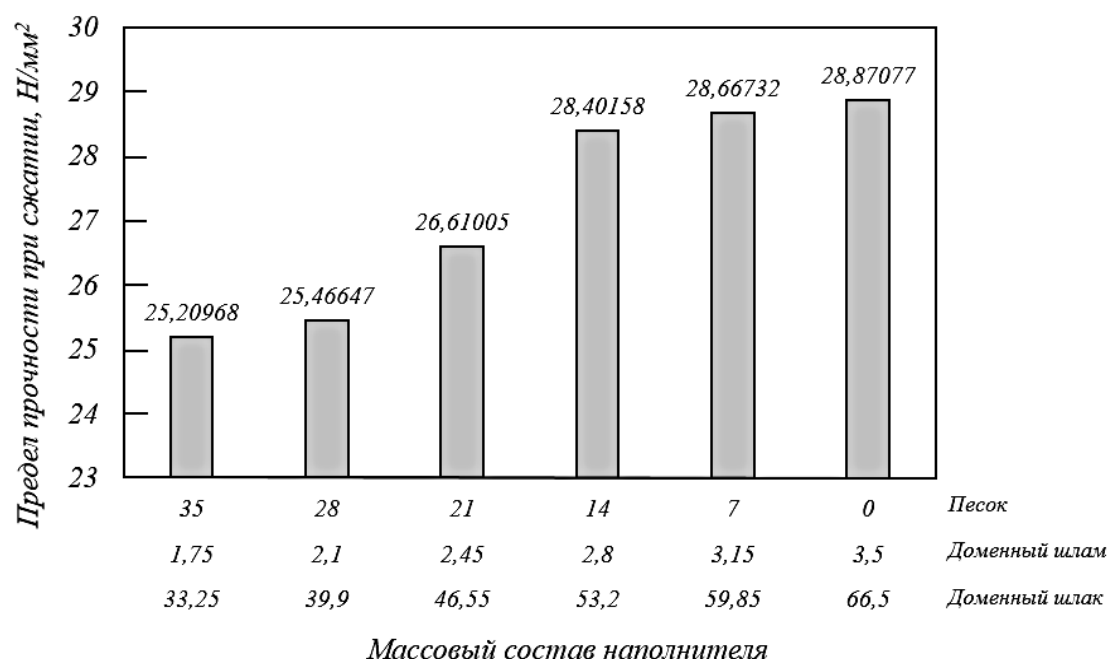
полиолефинов. С точки зрения ресурсосбережения это позволяет рассматривать указанные отходы не только как объект внутреннего металлургического рециклинга, но и как техногенное сырье для материалов смежных отраслей промышленности.

В исследованной системе металлургические отходы могут рассматриваться не только как частичная замена природного песка, но и как функциональный минеральный наполнитель, способный влиять на формирование структуры композита и его прочностные свойства. При этом характер такого влияния, по-видимому, определяется не только массовой долей отходов, но и гранулометрическим составом, влажностью, состоянием поверхности частиц и условиями переработки.

При интерпретации полученных значений следует учитывать геометрию образцов и отсутствие антифрикционных прокладок при испытаниях. В этих условиях не исключен вклад контактного трения в завышение предела прочности при сжатии. В дальнейшем целесообразно учитывать массу и плотность образцов как косвенные показатели пористости и однородности, а также применять антифрикционные прокладки для снижения влияния трения на результаты испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh N., Abdullah M.M., Ma X., Sharma V.K. Plastic recycling: A panacea or environmental pollution problem. *npj Materials Sustainability*. 2024;3:24. <https://doi.org/10.1038/s44296-024-00024-w>
2. Lamtai A., Elkoun S., Robert M., Mighri F., Diez C. Mechanical recycling of thermoplastics: A review of key issues. *Waste*. 2023;1(4):860–883. <https://doi.org/10.3390/waste1040050>
3. Shan C., Pandyaswargo A.H., Onoda H. Environmental impact of plastic recycling in terms of energy consumption. *Energies*. 2023;16(5):2199. <https://doi.org/10.3390/en16052199>



Предел прочности при сжатии опытных составов полимерно-минеральных композитов
Compressive strength of experimental polymer-mineral composites

4. Umar M., Singh L., Rashedi S.B. Microplastics removal from a plastic recycling industrial wastewater using sand filtration. *Water*. 2023;15(5):896. <https://doi.org/10.3390/w15050896>
5. Iftikhar B., Alih S.C., Vafaei M., Javed M.F., Rehman M.F., Abdullaev S.S., Tamam N., Khan M.I., Hassan A.M. Predicting compressive strength of eco-friendly plastic sand paver blocks using gene expression and artificial intelligence programming. *Scientific Reports*. 2023;13:12149. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39349-2>
6. Al-Sinan M.A., Bubshait A., Alotaibi Y., AlSwailem R., Almusallam T., Alabduljabbar H. Using plastic sand as a construction material toward a circular economy: a review. *Sustainability*. 2022;14(11):6446. <https://doi.org/10.3390/su14116446>
7. Elgharbawy A.S., Ali R.M., Youssef M.E., Ahmed N.S. A comprehensive review of the polyolefin composites and their applications. *Helvion*. 2022;8(7):e09932. <https://doi.org/10.1016/j.helivon.2022.e09932>
8. Rieger J., Colla V., Matino I., Stubbe G., Van Acker K., du Preez N., Jones P.T., Mundersbach D., van Beek W., Guzzon M. Residue valorization in the iron and steel industries: sustainable solutions for a cleaner and more competitive future Europe. *Metals*. 2021;11(8):1202. <https://doi.org/10.3390/>
9. Zhang J., Zhang Y., Long Y., Du P., Tian T., Ren Q. Multi-source ferrous metallurgical dust and sludge recycling: present situation and future prospects. *Crystals*. 2024; 14(3):273. <https://doi.org/10.3390/cryst14030273>
10. Smirnova O.M., Menendez-Pidal I., Alekseev A.V., Petrov D.N., Popov M.G. Strain hardening of polypropylene microfiber reinforced composite based on alkali-activated slag matrix. *Materials*. 2022;15(4):1607. <https://doi.org/10.3390/ma15041607>
11. Małek M., Łasica W., Kadela M., Kluczyński J., Dudek D. Physical and mechanical properties of polypropylene fibre-reinforced cement-glass composite. *Materials*. 2021;14(3):637. <https://doi.org/10.3390/ma14030637>
12. Dziecioł J., Radziemska M. Blast furnace slag, post-industrial waste or valuable building materials with remediation potential? *Minerals*. 2022;12(4):478. <https://doi.org/10.3390/min12040478>
13. Smarzewski P. Fresh and mechanical properties of high-performance self-compacting concrete containing ground granulated blast furnace slag and polypropylene fibres. *Applied Sciences*. 2023;13(3):1975. <https://doi.org/10.3390/app13031975>
14. Liu Y., Su Y., Xu G., Chen Y., You G. Research progress on controlled low-strength materials: metallurgical waste slag as cementitious materials. *Materials*. 2022;15(3):727. <https://doi.org/10.3390/ma15030727>
15. Ferreira R.S., Jesus G.A.M., Oliveira M.P. Eco-friendly and cost-effective high-density polyethylene-based composites: optimizing wood-plastic composites for enhanced performance.

- ACS Omega*. 2025;10(7):6437–6445. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06422>
16. Kumi-Larbi Jnr A., Mohammed L., Tagbor T.A., Tulashie S.K., Cheeseman C. Recycling waste plastics into plastic-bonded sand interlocking blocks for wall construction in developing countries. *Sustainability*. 2023;15(24):16602. <https://doi.org/10.3390/su152416602>
 17. Soni A., Das P.K., Yusuf M., Kamyab H., Chelliapan S. Development of sand-plastic composites as floor tiles using silica sand and recycled thermoplastics: a sustainable approach for cleaner production. *Scientific Reports*. 2022;12:18921. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19635-1>
 18. Perim T.B., de Souza F.F., Monteiro S.N., Candido V.S., Neves R.M., da Luz F.S. Characterization of artificial stone produced with blast furnace dust waste incorporated into a mixture of epoxy resin and cashew nut shell oil. *Polymers*. 2023;15(20):4181. <https://doi.org/10.3390/polym15204181>
 19. Zhao L., Zhao K., Shen Z., et al. Novel wood-plastic composite fabricated via modified steel slag: Preparation, mechanical and flammability properties. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2024;31(9):2110–2120. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-2829-4>
 20. Petousis M., Kalderis D., Michailidis N., Papadakis V., Mountakis N., Argyros A., Spiridaki M., David C., Sagris D., Vidakis N. Sustainable high-density polyethylene/ferro-nickel slag composites for material extrusion additive manufacturing: Engineering, morphological, rheological, thermal, and chemical aspects. *Sustainable Materials and Technologies*. 2025;43:e01227. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01227>
- ### REFERENCES
1. Singh N., Abdullah M.M., Ma X., Sharma V.K. Plastic recycling: A panacea or environmental pollution problem. *npj Materials Sustainability*. 2024;3:24. <https://doi.org/10.1038/s44296-024-00024-w>
 2. Lamtai A., Elkoun S., Robert M., Mighri F., Diez C. Mechanical recycling of thermoplastics: A review of key issues. *Waste*. 2023;1(4):860–883. <https://doi.org/10.3390/waste1040050>
 3. Shan C., Pandiyaswargo A.H., Onoda H. Environmental impact of plastic recycling in terms of energy consumption. *Energies*. 2023;16(5):2199. <https://doi.org/10.3390/en16052199>
 4. Umar M., Singh L., Rashedi S.B. Microplastics removal from a plastic recycling industrial wastewater using sand filtration. *Water*. 2023;15(5):896. <https://doi.org/10.3390/w15050896>
 5. Iftikhar B., Alih S.C., Vafaei M., Javed M.F., Rehman M.F., Abdullaev S.S., Tamam N., Khan M.I., Hassan A.M. Predicting compressive strength of eco-friendly plastic sand paver blocks using gene expression and artificial intelligence programming. *Scientific Reports*. 2023;13:12149. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39349-2>
 6. Al-Sinan M.A., Bubshait A., Alotaibi Y., AlSwailem R., Almusallam T., Alabduljabbar H. Using plastic sand as a construction material toward a circular economy: a review. *Sustainability*. 2022;14(11):6446. <https://doi.org/10.3390/su14116446>
 7. Elgharbawy A.S., Ali R.M., Youssef M.E., Ahmed N.S. A comprehensive review of the polyolefin composites and their applications. *Heliyon*. 2022;8(7):e09932. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09932>
 8. Rieger J., Colla V., Matino I., Stubbe G., Van Acker K., du Preez N., Jones P.T., Mundersbach D., van Beek W., Guzzon M. Residue valorization in the iron and steel industries: sustainable solutions for a cleaner and more competitive future Europe. *Metals*. 2021;11(8):1202. <https://doi.org/10.3390/>
 9. Zhang J., Zhang Y., Long Y., Du P., Tian T., Ren Q. Multi-source ferrous metallurgical dust and sludge recycling: present situation and future prospects. *Crystals*. 2024;14(3):273. <https://doi.org/10.3390/cryst14030273>
 10. Smirnova O.M., Menendez-Pidal I., Alekseev A.V., Petrov D.N., Popov M.G. Strain hardening of polypropylene microfiber reinforced composite based on alkali-activated slag matrix. *Materials*. 2022;15(4):1607. <https://doi.org/10.3390/ma15041607>
 11. Małek M., Łasica W., Kadela M., Kluczyński J., Dudek D. Physical and mechanical properties of polypropylene fibre-reinforced cement-glass composite. *Materials*. 2021;14(3):637. <https://doi.org/10.3390/ma14030637>
 12. Dzięcioł J., Radziemska M. Blast furnace slag, post-industrial waste or valuable building materials with remediation potential? *Minerals*. 2022;12(4):478. <https://doi.org/10.3390/min12040478>
 13. Smarzewski P. Fresh and mechanical properties of high-performance self-compacting concrete containing ground granulated blast furnace slag and polypropylene fibres. *Applied Sciences*. 2023;13(3):1975. <https://doi.org/10.3390/app13031975>
 14. Liu Y., Su Y., Xu G., Chen Y., You G. Research progress on controlled low-strength materials:

- metallurgical waste slag as cementitious materials. *Materials*. 2022;15(3):727.
<https://doi.org/10.3390/ma15030727>
15. Ferreira R.S., Jesus G.A.M., Oliveira M.P. Eco-friendly and cost-effective high-density polyethylene-based composites: optimizing wood-plastic composites for enhanced performance. *ACS Omega*. 2025;10(7):6437–6445.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06422>
 16. Kumi-Larbi Jnr A., Mohammed L., Tagbor T.A., Tulashie S.K., Cheeseman C. Recycling waste plastics into plastic-bonded sand interlocking blocks for wall construction in developing countries. *Sustainability*. 2023;15(24):16602.
<https://doi.org/10.3390/su152416602>
 17. Soni A., Das P.K., Yusuf M., Kamyab H., Chel-liapan S. Development of sand-plastic composites as floor tiles using silica sand and recycled thermoplastics: a sustainable approach for cleaner production. *Scientific Reports*. 2022;12:18921.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-19635-1>
 18. Perim T.B., de Souza F.F., Monteiro S.N., Candido V.S., Neves R.M., da Luz F.S. Characterization of artificial stone produced with blast furnace dust waste incorporated into a mixture of epoxy resin and cashew nut shell oil. *Polymers*. 2023;15(20):4181.
<https://doi.org/10.3390/polym15204181>
 19. Zhao L., Zhao K., Shen Z., et al. Novel wood-plastic composite fabricated via modified steel slag: Preparation, mechanical and flammability properties. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2024;31(9):2110–2120.
<https://doi.org/10.1007/s12613-024-2829-4>
 20. Petousis M., Kalderis D., Michailidis N., Papadakis V., Mountakis N., Argyros A., Spiridaki M., David C., Sagris D., Vidakis N. Sustainable high-density polyethylene/ferro-nickel slag composites for material extrusion additive manufacturing: Engineering, morphological, rheological, thermal, and chemical aspects. *Sustainable Materials and Technologies*. 2025;43:e01227.
<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01227>

Сведения об авторах:

Екатерина Геннадьевна Чумачкова, обучающийся кафедры металлургии черных металлов и химических технологий, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: Katya.Arsenteva383@gmail.com
ORCID: 0009-0000-7121-4645

Илья Игоревич Чумачков, аспирант кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: I.I.Chumachkov@yandex.ru
ORCID: 000-0003-4721-6821
SPIN-код: 7158-1210

Сергей Владимирович Фейлер, к.т.н., заведующий кафедрой металлургии черных металлов и химических технологий, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: feiler_sv@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-8615-5411
SPIN-код: 5452-0396

Information about the authors:

Ekaterina G. Chumachkova, Student of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technologies, Siberian State Industrial University

E-mail: Katya.Arsenteva383@gmail.com
ORCID: 0009-0000-7121-4645

Ilya I. Chumachkov, Postgraduate Student of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University

E-mail: I.I.Chumachkov@yandex.ru
ORCID: 000-0003-4721-6821
SPIN-код: 7158-1210

Sergey V. Feiler, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals and Chemical Technologies, Siberian State Industrial University

E-mail: feiler_sv@sibsiu.ru
ORCID: 000-0003-4721-6821
SPIN-код: 7158-1210

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 17.04.2026

После доработки 13.05.2026

Принята к публикации 23.05.2026

Received 17.04.2026

Revised 13.05.2026

Accepted 23.05.2026