DOI: 10.58168/PBHT2026_321-327
УДК 620.22-419.8:669.054.85

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ «ЗЕЛЕНЫХ» КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ КАК ФАКТОР ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

ANALYSIS OF MODERN APPROACHES TO THE CREATION OF "GREEN" COMPOSITES BASED ON METALLURGICAL SLAGS AS A FACTOR OF PRODUCTION ENERGY EFFICIENCY

Стородубцева Т.Н., доктор технических наук, доцент, профессор кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Россия, Воронеж

Жабин Д.А., аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Россия, Воронеж

Жигунова Д.Э., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Storodubtseva T.N., DrSc in Technical Sciences, Docent, Professor of the Industrial Transport, Construction and Geodesy Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russia, Voronezh

Zhabin D.A., Postgraduate Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russia, Voronezh

Zhigunova D.E., Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Статья посвящена анализу современных подходов к созданию полимерных композиционных материалов с использованием металлургических шлаков как вторичного сырья. Рассматривается эволюция отношения к техногенным отходам: от экологической угрозы до ценного ресурса для «зеленой» экономики. На основе анализа научных исследований выявлены закономерности влияния химического и фракционного состава шлаков (доменных, конвертерных, электросталеплавильных) на физико-механические свойства композитов. Показано, что включение шлаков в полимерные матрицы позволяет не только утилизировать миллионы тонн отходов, но и снижать энергозатраты на производство материалов за счет замены первичного сырья и уменьшения расходов на хранение отходов. Стратегическим решением предлагается переход к принципам промышленного симбиоза, где отходы металлургии становятся сырьем для производства энергоэффективных строительных и технических материалов. Делается вывод о необходимости объединения научных разработок, промышленного потенциала и государственной поддержки для формирования малоотходных производственных циклов.

Ключевые слова: металлургические шлаки, полимерные композиты, энергоэффективность, утилизация отходов, ресурсосбережение, циркулярная экономика, «зеленые» материалы.

© Стородубцева Т. Н., Жабин Д. А., Жигунова Д. Э., 2026

Abstract. The article analyzes modern approaches to the creation of polymer composite materials using metallurgical slags as secondary raw materials. The evolution of attitudes towards technogenic waste is considered: from an environmental threat to a valuable resource for the "green" economy. Based on the analysis of scientific research, the patterns of the influence of the chemical and fractional composition of slags (blast furnace, converter, electric arc furnace) on the physical and mechanical properties of composites are revealed. It is shown that the incorporation of slags into polymer matrices allows not only to dispose of millions of tons of waste, but also to reduce energy consumption for material production by replacing primary raw materials and reducing waste storage costs. The strategic solution proposed is the transition to the principles of industrial symbiosis, where metallurgical waste becomes a raw material for the production of energy-efficient construction and technical materials. The conclusion emphasizes the need to combine scientific research, industrial potential, and state support to form low-waste production cycles.

Keywords: metallurgical slags, polymer composites, energy efficiency, waste recycling, resource conservation, circular economy, "green" materials.

Металлургические шлаки: от «наследия индустриализации» к стратегическому ресурсу. Урал традиционно считается историческим центром российской металлургии, но многолетняя промышленная активность породила серьёзную проблему накопление огромных объёмов техногенных отходов. Эксперты отмечают, что около 25% территории региона сегодня находятся в кризисном экологическом состоянии из-за загрязнений, вызванных складированием производственных отходов [1]. Главные «поставщики» таких отходов горнодобывающие и металлургические предприятия, а также теплоэнергетические объекты. Суммарный объём накопленных отходов исчисляется миллиардами тонн. Для их хранения приходится выделять большие площади земли и строить дорогостоящие хранилища, что наносит дополнительный урон окружающей среде. Парадокс ситуации в том, что шлаки, десятилетиями воспринимавшиеся лишь как экологическая угроза, на самом деле обладают свойствами, позволяющими рассматривать их как ценное техногенное сырьё.

По своей структуре металлургические шлаки, такие как доменные, сталеплавильные и конвертерные представляют собой сложные оксидные системы. Согласно данным рентгеноспектрального анализа, доменный шлак преимущественно состоит из оксида кальция (CaO – до 38%), кремния (SiO_2 – около 36 %) и алюминия (Al_2O – 13 %), что делает его по составу близким к природным минеральным наполнителям. Важной особенностью является присутствие в шлаках оксидов железа, магния, марганца и ряда других элементов, способных придавать композитам специфические свойства (например, ферромагнитные). Ключевое различие между разными типами отходов заключается в их дисперсности: зола уноса тепловых электростанций на 90% состоит из частиц размером менее 0,25 мм, тогда как доменный шлак для достижения однородности требует дополнительного измельчения [2]. Эволюция подходов к переработке. Исторически шлаки применялись главным образом в дорожном строительстве и при производстве цемента. Вовлечение же их в полимерные композиты относительно новое направление, получившее развитие в последние десятилетия.

Если в развитых странах уровень утилизации отходов теплоэнергетики достигает 50-90 %, то в России этот показатель долгое время не превышал 4-5 %. В настоящее время

ситуация меняется: разрабатываются технологии производства композитов для строительной, рекламной и упаковочной отраслей, а также специальных материалов магнитоуправляемых герметиков, термоинтерфейсных материалов, наполнителей для резиновых смесей [3]. Энергетический аспект проблемы. Производство первичных наполнителей (мела, талька, технического углерода) требует значительных энергозатрат на добычу, дробление, обогащение и транспортировку. Металлургические шлаки, будучи уже извлеченными на поверхность и частично переработанными, представляют собой материал с уже затраченной энергией (так называемый «воплощенный углерод»). Применение подобных материалов даёт возможность сократить потребление энергоресурсов на всём производственном цикле начиная с этапа добычи сырья и заканчивая утилизацией отходов.

В данном контексте «зелёные» композиты оказываются не просто экологически безопасной заменой традиционным материалам, а реальным средством достижения энергоэффективности. Что касается использования металлургических шлаков в качестве наполнителей, анализ научных работ показывает: определяющую роль для их успешного внедрения в композиты играют химический состав и распределение частиц по размерам. Исследования доменных шлаков Магнитогорского металлургического комбината, проведённые О.В. Ершовой и Л.Г. Колядой, зафиксировали в их составе до 38 % оксида кальция и около 36 % диоксида кремния. Это обеспечивает высокую степень совместимости с полярными полимерами, в частности с поливинилхлоридом. При этом шлаковый материал нуждается в разделении на фракции: в исходной массе присутствуют частицы размером от 0,25 до 5 мм и крупнее, в то время как для получения качественных композиционных материалов требуется фракция менее 0,25 мм либо применение методов, обеспечивающих однородность смеси [4].

Значимым достижением последних лет стало подтверждение возможности использования не только доменных, но и конвертерных шлаков, а также шлаков электродуговых печей. В работах A. Gobetti с соавторами показано, что шлаки электродуговой плавки могут эффективно вводиться в термопластичные (полипропилен), термореактивные (эпоксидные смолы) и эластомерные (бутадиен-нитрильный каучук) полимерные матрицы [5]. Введение такого наполнителя способствует повышению твёрдости и модуля упругости композитов, хотя и сопровождается некоторым снижением ударной вязкости. Ещё более неожиданные результаты были получены при исследовании сталеплавильных шлаков как наполнителей для термоинтерфейсных материалов: выяснилось, что оксид кальция, который прежде рассматривался как фактор, затрудняющий использование шлаков в бетонных смесях, улучшает теплопроводящие свойства композитов [1].

Разработка эффективных материалов для отвода тепла в электронных устройствах становится действительной благодаря современным технологиям для получения композитов, которые включают последовательные этапы: сбор и разделение отходов, их измельчение до нужной фракции, смешивание с полимерным связующим и последующее формование изделий.

Часто в качестве полимерной матрицы используют вторичные полимеры, например, ПВХ, получаемый при демонтаже оконных профилей [6]. При таком подходе перерабатываются минеральные и полимерные отходы. Вспененные композиты представляют

особый интерес, в их производстве применяют порофоры, в частности ЧХЗ-21 (диамид азодикарбоновой кислоты). Комбинация вспенивателя со шлаком помогает улучшить его теплоизоляционные и звукоизоляционные свойства, снизить плотность материала, а также сократить его себестоимость. Современные исследования направлены на преодоление проблемы себестоимости компонентов, поскольку шлаки обладают гидрофильными свойствами, а большинство полимеров обладают гидрофобными свойствами, требуется модифицировать поверхность наполнителя. По результатам экспериментов установлено, что введение шлаков в полимерные материалы повышает их твёрдость и модуль упругости на 30-50 %, причём величина прироста зависит от степени наполнения. Кроме того, отмечается рост термостойкости материала, шлаки сохраняют стабильность при температурах вплоть до 600°C [7]. Важно соблюдать баланс: при превышении оптимальной концентрации наполнителя, которая обычно составляет 10-30 мас. %, прочность материала снижается из-за нарушения целостности полимерной матрицы.

При оценке энергоэффективности производства «зелёных» композитов нужно учитывать несколько аспектов. Во-первых, снижается экологическая нагрузка: уменьшаются площади полигонов для захоронения отходов и сокращаются выбросы при добыче первичного сырья. Во-вторых, достигается прямая экономия энергии, производство наполнителя из отходов требует в 3-5 раз меньше энергозатрат, чем изготовление первичного минерального порошка. В-третьих, использование локальных отходов позволяет сократить транспортные расстояния и связанные с ними выбросы углекислого газа.

Хороший пример, замещение технического углерода в резинах. Производство сажи крайне энергоёмкий процесс, который основан на неполном сгорании нефтяных масел. Если заменить 10 phr (частей на сто частей каучука) технического углерода шлаком, можно сохранить прочностные характеристики материала и одновременно снизить гистерезисные потери на 30 %. Шины и резинотехнические изделия с таким наполнителем нагреваются меньше при циклических нагрузках, благодаря чему энергоэффективность готовой продукции повышается напрямую. Широкому внедрению подобных технологий препятствуют несколько факторов: отсутствие систематизированной классификации шлаков в качестве сырья для полимерных композитов, нехватка нормативной базы, которая регламентировала бы состав и свойства подобных материалов, а также отсутствие современных производственных мощностей для глубокой переработки отходов, в том числе для тонкого измельчения, классификации и модификации поверхности.

Экологическая безопасность имеет ключевое значение. Шлаки могут содержать тяжёлые металлы способные к выщелачиванию. При этом исследования подтверждают, что включение шлака в полимерную матрицу заметно снижает миграцию таких элементов, хотя постоянный мониторинг и разработка методов пассивации потенциально опасных компонентов по-прежнему необходимы. Положительный пример концепция территориально-промышленных кластеров: в них отходы металлургии превращаются в ресурс для стройиндустрии и производства полимерных изделий, что воплощает принципы циркулярной экономики и промышленного симбиоза, когда побочные продукты одного производства становятся сырьём для другого. Современные исследования смещают акцент с подхода «утилизация ради утилизации» в сторону создания функциональных материалов с

заданными характеристиками: металлургические шлаки всё чаще воспринимают не как дешёвый балласт, а как активный компонент, способный наделять композиты уникальными свойствами. К примеру, созданы магнитоуправляемые герметизирующие композиты на основе конвертерных шлаков с ферромагнитной фазой они подходят для герметизации трещин в железобетонных конструкциях под действием магнитного поля. Ещё одно перспективное направление разработка термоинтерфейсных материалов с высокой теплопроводностью (до 3,64 Вт/м·К) и одновременно высоким электрическим сопротивлением: такие решения оптимальны для отвода тепла в мощных электронных устройствах и изготавливаются из ранее считавшихся непригодными для переработки отходов. Согласно обзорным работам последних лет, армирование полимеров наполнителями из промышленных отходов один из самых перспективных путей создания устойчивых материалов, соответствующих принципам «зелёной» химии и циркулярной экономики [8]. Подобные материалы уже применяют в экранировании электромагнитного излучения, очистке сточных вод, производстве строительных панелей, автомобильных компонентов и даже лопастей ветрогенераторов [9].

Выводы

Анализ современных подходов к созданию «зелёных» композитов на основе металлургических шлаков даёт ряд важных выводов. Доменные, конвертерные и электросталеплавильные шлаки ценное техногенное сырьё для полимерных композиционных материалов. Их химический состав с преобладанием оксидов кальция, кремния и алюминия, а также такие физические свойства, как термостабильность, твёрдость и наличие ферромагнитных фаз, позволяют не просто заменять традиционные минеральные наполнители, но и наделять материалы новыми функциональными характеристиками. За последние годы технологии переработки шлаков в композиты вышли за рамки лабораторных экспериментов и успешно внедряются в промышленность: оптимизированы составы смесей и режимы переработки, разработаны методы модификации поверхности, повышающие совместимость с полимерными матрицами. Экспериментально подтверждено, что наилучший результат достигается при содержании шлака в композитах на уровне 10–30 мас. %, которое варьируется в зависимости от типа матрицы и заданных свойств материала. Важнейший вклад этой технологии в решение задач энергоэффективности и энергосбережения состоит в сокращении совокупных энергозатрат благодаря переходу от линейной модели «добыча-использование-захоронение» к циркулярной схеме «отходы-сырьё-продукция». Замещение первичных наполнителей вторичными сокращает энергоемкость производства на 20-50 %, уменьшает выбросы парниковых газов и предотвращает загрязнение окружающей среды. Опыт последних лет показывает, что системный подход к проблеме, опирающийся на научные исследования, промышленную кооперацию и государственную поддержку, способен превратить накопленные отходы в источник экономического роста и экологического благополучия. Необходимо создание нормативной базы, развитие сети перерабатывающих производств и подготовка специалистов в области техногенного сырья. Современный кризис в обращении с отходами металлургии – это результат многолетнего накопления экологических проблем. Но он же открывает окно возможностей для внедрения прорывных технологий. Научная база сформирована, промышленный потенциал существует, общественный запрос на экологизацию производства звучит все громче. Остается объединить эти факторы

политической волей и экономическими стимулами, чтобы запустить масштабный процесс трансформации отходов в ресурсы во имя энергоэффективности и устойчивого развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ершова, О.В. Исследование возможности совместной переработки техногенных минеральных и полимерных отходов / О.В. Ершова, Л.Г. Коляда // Теория и технология металлургического производства. – 2013. – № 1. – С. 71-73.

2. Физико-механические характеристики композиционных материалов на основе отходов производства с различными рецептурами / А.Е. Бурдонов, В.В. Барахтенко, Е.В. Зелинская [и др.] // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 9. – С. 14-22.

3. Das, O. Natural and industrial wastes for sustainable and renewable polymer composites / O. Das, K. Babu, V. Shanmugam [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 158. – Art. 112054.

4. Ning, S. Research on the Interface Mechanism and Properties of Silicon-Hybrid Acrylic Resin-Modified Steel Slag as a Functional Filler for Natural Rubber / S. Ning, Z. Wu, Y. Zhang // Polymer Engineering and Science. – 2025. – Vol. 66, No. 2. – P. 1229-1241.

5. Kang, J.H. Recycling Bottom Ash and Steel Slag Containing CaO into Electrically Insulating and Heat-Dissipating Thermal Interface Materials / J.H. Kang, M. Gyeong Kang, J.J. Hong [et al.] // Advanced Energy and Sustainability Research. – 2024. – Vol. 5, No. 12. – Art. 2400291. – DOI 10.1002/aesr.202400291.

6. Гончарова, М.А. Структурообразование и технологии композитов общего и специального назначения на основе малоиспользуемых отходов металлургии / М.А. Гончарова, Е.М. Чернышов. – Воронеж : ВГТУ, 2022. – 156 с.

7. Jaberi, A. Sustainable Polymer Composites from Industrial Wastes / A. Jaberi, E.N. Dresvyanina // Reviews on Advanced Materials and Technologies. – 2025. – Vol. 7, No. 1. – P. 24-52.

8. Gobetti, A. Innovative Reuse of Electric Arc Furnace Slag as Filler for Different Polymer Matrixes / A. Gobetti, G. Cornacchia, G. Ramorino // Minerals. – 2021. – Vol. 11, No. 8. – Art. 832.

9. Kaddouhi, M. Valorization of steel slag in clay: Thermophysical study and energy simulation in Oujda (Morocco) / M. Kaddouhi, M. Drissi, O. Horma [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2025. – Vol. 680. – Art. 00103.

REFERENCES

1. Ershova, O.V. Study of the possibility of joint processing of technogenic mineral and polymer waste / O.V. Ershova, L.G. Kolyada // Theory and technology of metallurgical production. – 2013. – No. 1. – P. 71-73.

2. Physicomechanical characteristics of composite materials based on production waste with different formulations / A.E. Burdonov, V.V. Barakhtenko, E.V. Zelinskaya [et al.] // Journal of Civil Engineering. – 2012. – No. 9. – P. 14-22.

3. Das, O. Natural and industrial wastes for sustainable and renewable polymer composites / O. Das, K. Babu, V. Shanmugam [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 158. – Art. 112054.

4. Ning, S. Research on the Interface Mechanism and Properties of Silicon-Hybrid Acrylic Resin-Modified Steel Slag as a Functional Filler for Natural Rubber / S. Ning, Z. Wu, Y. Zhang // Polymer Engineering and Science. – 2025. – Vol. 66, No. 2. – P. 1229-1241.

5. Kang, J.H. Recycling Bottom Ash and Steel Slag Containing CaO into Electrically Insulating and Heat-Dissipating Thermal Interface Materials / J.H. Kang, M. Gyeong Kang, J.J. Hong [et al.] // Advanced Energy and Sustainability Research. – 2024. – Vol. 5, No. 12. – Art. 2400291. – DOI 10.1002/aesr.202400291.

6. Goncharova, M.A. Structure formation and technologies of general-purpose and special-purpose composites based on underutilized metallurgy waste / M.A. Goncharova, E.M. Chernyshov. – Voronezh: VSTU, 2022. – 156 p.

7. Jaberi, A. Sustainable Polymer Composites from Industrial Wastes / A. Jaberi, E.N. Dresvyanina // Reviews on Advanced Materials and Technologies. – 2025. – Vol. 7, No. 1. – P. 24-52.

8. Gobetti, A. Innovative Reuse of Electric Arc Furnace Slag as Filler for Different Polymer Matrices / A. Gobetti, G. Cornacchia, G. Ramorino // Minerals. – 2021. – Vol. 11, No. 8. – Art. 832.

9. Kaddouhi, M. Valorization of steel slag in clay: Thermophysical study and energy simulation in Oujda (Morocco) / M. Kaddouhi, M. Drissi, O. Horma [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2025. – Vol. 680. – Art. 00103.