

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2022, №6, Том 14 / 2022, No 6, Vol 14 <https://esj.today/issue-6-2022.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/30NZVN622.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Пашкевич, М. А. Современные тенденции управления отходами доменного производства / М. А. Пашкевич, Ю. А. Куликова // Вестник евразийской науки. — 2022. — Т. 14. — № 6. — URL: <https://esj.today/PDF/30NZVN622.pdf>

For citation:

Pashkevich M.A., Kulikova Yu.A. Current trends in blast furnace waste management. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022; 14(6): 30NZVN622. Available at: <https://esj.today/PDF/30NZVN622.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

Пашкевич Мария Анатольевна

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург, Россия
Заведующий кафедрой «Геоэкологии»
Доктор технических наук, профессор
E-mail: mpash@spmi.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7020-8219>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=405611

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57188568215>

Web of Science: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/D-4761-2014>

Куликова Юлия Алексеевна

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург, Россия
«Горный» факультет
Аспирант кафедры «Геоэкологии»
E-mail: yuliyakulikova1997@mail.ru

Современные тенденции управления отходами доменного производства

Аннотация. Интенсивное развитие промышленного производства оказывает вредное воздействие на окружающую среду, вызывая ее трансформацию. Среди отраслей промышленности особое внимание уделяется черной металлургии, основные отходы которой представлены шлаком, шламом и отходами коксохимического производства. Доменный шлак является побочным продуктом при выплавке чугуна в доменной печи при смешении железосодержащей руды, флюса и топлива в виде кокса. Несмотря на его многотоннажное образование в Российской Федерации используется всего около 10 % рассматриваемых отходов. В этой связи в течение последних десятилетий активно развиваются направления их утилизации с целью повышения экологической безопасности и достижения экономического эффекта. Наибольший спрос доменного шлака наблюдается в его применении в производстве бетонов и в конструировании дорожных одежд. Применение доменного шлака в качестве мелиорантов при рекультивации техногенно нарушенных земель до конца не изучено и имеет ряд своих особенностей. В статье рассматриваются основные направления вторичного использования доменного шлака в российской и зарубежной практике, оцениваются положительные и отрицательные аспекты его применения в той или иной отрасли. Основным недостатком их использования в производстве бетонов является невозможность полного замещения ими природного материала без потери качества, а также применение небезопасных активирующих добавок при производстве бесклинкерного вяжущего материала. Необходимым условием использования доменного шлака в дорожном строительстве является его устойчивость к распадам, морозоустойчивость и влагонепроницаемость. Применение шлака в

сельском хозяйстве возможно только при предварительной оценке его фитотоксичности и содержания в нем тяжелых металлов.

Ключевые слова: отходы металлургического производства; доменный шлак; строительная промышленность; шлакопортландцемент; геополимерный бетон; дорожное строительство; рекультивация техногенно нарушенных земель

Введение

Интенсивность промышленного производства изо дня в день набирает все большие обороты, что сопровождается нарастанием масштабов разработки и добычи полезных ископаемых. Помимо положительных аспектов, в части повышения уровня жизни населения, имеются и негативные последствия, заключающиеся в техногенном воздействии предприятий по добыче и переработке минерального сырья на окружающую среду, приводящие к её трансформации.

Среди отраслей промышленности, негативно воздействующих на компоненты природной среды, черная металлургия занимает одно из ведущих мест. Помимо загрязнения атмосферного воздуха газо-пылевыми выбросами, основной проблемой предприятий чёрной металлургии остается образование и складирование мегатоннажных отходов производства и передела чугуна и стали, представленных шлаками, шламами и отходами коксохимического производства [1; 2].

Так по данным Росприроднадзора за 2020 год только выход доменного шлака составил 8,6 млн т. В результате этого возникает необходимость в поиске методов управления отходами и способов их вторичного использования. В данной статье рассматриваются направления безопасной и рациональной утилизации доменных шлаков.

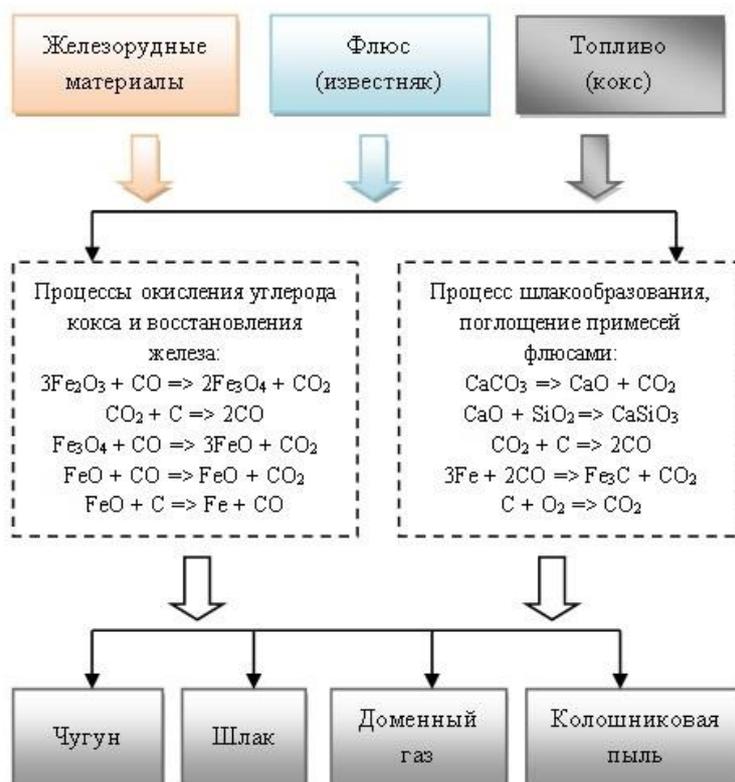


Рисунок 1. Химический процесс образования чугуна и доменного шлака (разработано автором)

Доменный шлак является побочным продуктом при выплавке чугуна в доменной печи при смешении железосодержащей руды, флюса и топлива в виде кокса. Чугун образуется при восстановлении оксидов железа оксидом углерода. Процесс сопровождается нагреванием материала до температуры на уровне 1200°C, за счет чего происходит процесс плавления пустой породы, состоящей в основном из кремнезема, который в свою очередь взаимодействует с оксидом кальция флюса, а также невосстановленными оксидами железа и марганца [3]. Основные химические процессы образования чугуна и доменного шлака представлены на рисунке 1.

Главными компонентами химического состава доменных шлаков являются такие оксиды как CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, FeO, Fe₂O₃, MnO и S. Концентрации компонентов в процентном содержании представлены в таблице 1 и варьируются в зависимости от состава железных руд и золы кокса [4; 5].

Таблица 1

Процентное содержание компонентов доменного шлака

Содержание компонента, %						
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	S
34–43	27–38	7–12	7–15	0,2–1,6	0,15–0,76	1,0–1,9

Доменные шлаки характеризуется модулем основности (M₀), который определяется по соотношению суммы CaO и MgO к сумме SiO₂ и Al₂O₃. При M₀ > 1 шлаки являются основными, при M₀ = 1 нейтральными, а при M₀ < 1 кислыми [6].

Основной проблемой использования доменных шлаков как вторичного ресурса является их склонность к силикатному распаду [7]. Силикатный распад обусловлен полиморфными превращениями двухкальциевого силиката при длительном охлаждении шлака, который сопровождается увеличением его объема на 10–12 %. Перед дальнейшим использованием необходимо, чтобы шлак прошел все стадии распада. Для этого используется технология мокрой грануляции для его быстрого охлаждения, что имеет свои негативные последствия в виде выброса сероводорода в воздушное пространство.

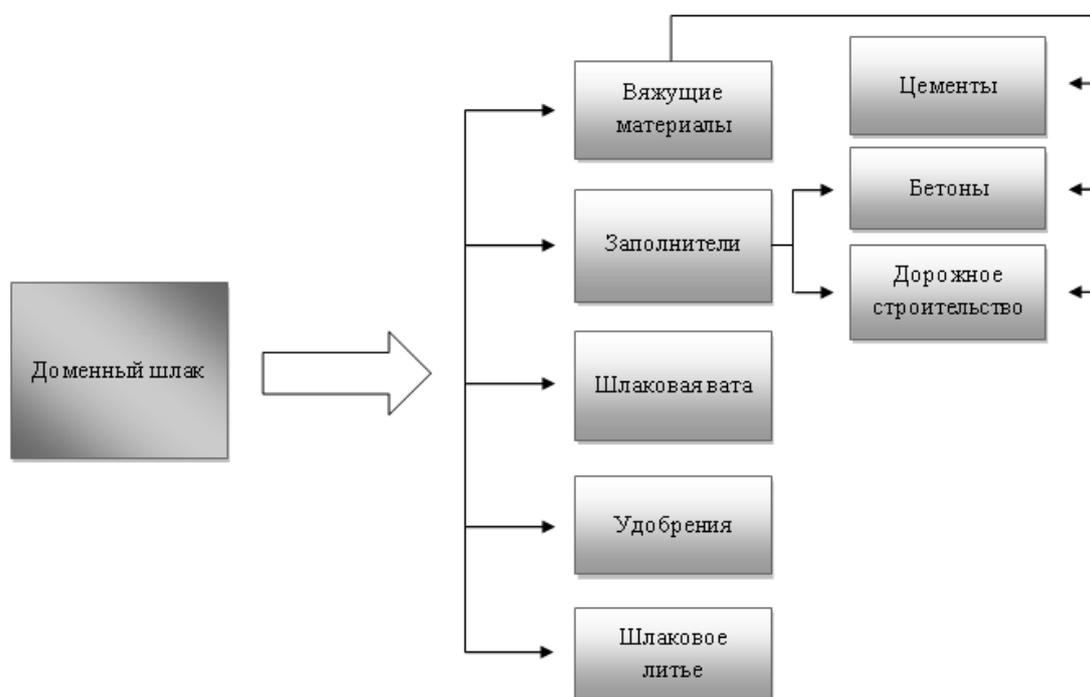


Рисунок 2. Направления утилизации доменного шлака (составлено автором)

Необходимость утилизации накопленных и вновь образующихся отходов доменного производства обуславливается, с одной стороны, сокращением площадей земель, отчуждаемых под хранилища отходов, с другой стороны, использованием отходов в качестве техногенного минерального сырья взамен невозобновляемых и исчерпаемых природных ресурсов.

Различные направления вторичного использования доменных шлаков рассматриваются на протяжении последних десятилетий. Основные направления их утилизации представлены на рисунке 2.

Проблемой вторичного использования шлаков в каком-то одном направлении является содержание в них компонентов, ухудшающих качество того или иного товарного продукта на их основе. В связи с этим необходимы дальнейшее изучение и разработка процессов утилизации шлаков, позволяющих снивелировать эти негативные тенденции. Для этого рассмотрим существующие варианты утилизации шлака.

Применение шлака в строительной отрасли

Доменные шлаки имеют схожие физико-химические свойства с горными породами, которые используются в строительной отрасли. Причем они могут быть использованы как в качестве добавки, так и полностью заменить традиционное минеральное сырье.

Основным потребителем доменных шлаков является цементная промышленность. Традиционный цемент представляет собой неорганическое вяжущее вещество, состоящее из карбонатных и глинистых горных пород с различными видами добавок. Доменный шлак в приготовлении цемента используется в двух направлениях: как активная минеральная добавка и как сырьевой компонент.

Цемент по виду и содержанию в нем активных минеральных добавок согласно ГОСТ 31108-2020 классифицируют на 5 типов. Так наиболее распространенный в строительной отрасли портландцемент подразделяется на I и II тип. Цемент III категории носит название шлакопортландцемент. Оставшиеся две группы — IV и V представляют собой пуццолановые и композиционные цементы, соответственно. Содержание портландцемента и доменного шлака в каждом типе варьируется в определенном соотношении, которое представлено в таблице 2.

Таблица 2

Компонентный состав цемента

Основные компоненты	Тип цемента и содержание в нем основных компонентов, % по массе				
	ЦЕМ I	ЦЕМ II	ЦЕМ III	ЦЕМ IV	ЦЕМ V
Портландцемент	95-100	65-94	5-64	45-89	20-64
Доменный шлак	-	6-35	36-95	-	18-49

Основными критериями оценки качества изготавливаемого цемента служат такие показатели как прочность на сжатие через 28 суток, водопотребность для получения нормальной плотности материала, сроки схватывания, удобоукладываемость и его морозостойкость [8].

Применение доменного шлака в качестве минеральных добавок в цементе позволяет решать экологические проблемы, связанные со складированием многотоннажных отходов, а также снизить затраты на производство традиционных цементов [9]. При использовании шлака уменьшается проницаемость цемента, а также повышается его устойчивость к коррозиям. Однако с увеличением ввода шлака прочностные характеристики претерпевают изменение в худшую сторону. Так, при вводе шлака до 15 % по массе цемента, класс цемента остается тем же, несмотря на незначительное понижение прочности, в то время как при увеличении шлака содержания до 40 % происходит снижение класса цемента на целую марку [10]. Заниженные

показатели прочности регистрируются в основном в начальные сроки твердения, затем после 28 суток прочность возрастает и достигает показателей традиционного портландцемента [11]. При повышении тонкости помола доменного шлака и его двухстадийной обработки, где вначале происходит измельчение портландцемента отдельно, а затем вместе со шлаком, можно добиться увеличения значений показателей качества цемента [12].

Производство портландцемента сопряжено с обжигом клинкера (смеси известняка и глины), что является процессом энергоемким и как следствие сопровождается значительными выбросами углекислого газа. В связи с этим возникает интерес к бесклинкерным вяжущим, сырьем для которого так же может служить доменный шлак [13].

Основным недостатком бесклинкерных вяжущих на основе доменного шлака является их низкая гидравлическая активность при модуле основности шлака (M_o) менее 1, что обуславливает их медленное твердение и, как следствие, их невысокую прочность. Тем не менее, твердение можно вызвать искусственно с применением добавок активаторов, приводящих к повышению скорости формирования кристаллических структур в материале.

Другим направлением использования шлаков в цементной промышленности являются шлакощелочные вяжущие, созданные путем смешения мелкоизмельченных гранулированных шлаков и щелочных компонентов. В 1957 году В.Д. Глуховский впервые упоминает о шлакощелочных вяжущих и бетонах на их основе [14]. Подразумевается, что такие вяжущие состоят из алюмосиликатных материалов, затворяемых растворами щелочей или солей при протекании щелочной реакции [15]. В результате образуются гидроалюмосиликаты, которые придают материалу высокую пластичность и, как следствие, получают быстротвердеющими и высокопрочными вяжущими.

С основными шлаками в качестве активатора могут применяться все щелочные соединения или их смеси, дающие в воде щелочную реакцию. Для кислых шлаков возможно применение только едких щелочей и щелочных силикатов. Возможно применение несиликатных солей слабых кислот, но только при условии тепловлажностной обработки [16]. К основным щелочным активаторам можно отнести гидроксиды калия и натрия или их растворы, а также кальцинированную соду [17].

Так при получении шлакощелочного вяжущего на основе отвальных доменных шлаков, измельченных до удельной поверхности $2700-4950 \text{ см}^2/\text{г}$, в качестве активатора использовался водный раствор (СЩП) с массовыми долями компонентов 33,7 % Na_2CO_3 и 0,71 % NaOH [18]. В поздние сроки твердения, после 90-ти дней наблюдается потенциал вяжущего, о чем можно судить по результатам показателя прочности на сжатие (37,16 МПа).

Зарубежный опыт использования шлакощелочного вяжущего показывает широкое применение золы уноса и доменного шлака с различными видами добавок активаторов. Так при использовании силиката натрия в количестве $109 \text{ кг}/\text{см}^3$ максимальная прочность на сжатие через 28 дней затвердения достигала 52 МПа [19]. Приготовленное связующее на основе 10 % карбоната натрия и 10 % оксида магния с золой уноса и доменным шлаком увеличил прочность на сжатие образца цемента до 65 МПа за 28 дней [20]. Особое внимание заслуживает смесь золы уноса и доменного шлака в количестве $680 \text{ кг}/\text{м}^3$ и $156 \text{ кг}/\text{м}^3$ кремнекислого натрия, прочность на сжатие которого достигала 105 МПа через 28 дней [21].

Основной минус таких активаторов состоит в их опасности для человека, что требует соблюдения мер предосторожности при их применении [16].

Доменные шлаки также широко применяются в получении бетонов, которые состоят из вяжущего и разных по крупности и виду заполнителей. Причем шлак может быть использован как в качестве вяжущего, так и в качестве заполнителя.

При частичной замене 10 % портландцемента доменным гранулированным шлаком бетон по истечению срока в 28 дней приобретает прочность на 13 % выше, чем бетон на 100 % состоящий из портландцемента. Но при увеличении содержания шлака до 30 % конечная прочность снижается на 7 % [22].

На сегодняшний день ключевым элементом технологии изготовления бетонов является применение суперпластификаторов, которые увеличивают текучесть материала, уменьшают водопотребность и в дальнейшем повышают прочность бетонных конструкций.

Так при добавлении шлака, содержание которого составило 15 и 30 % от массы цементного раствора, при соотношении вяжущего и мелкого заполнителя 1:1,2 и дозировке суперпластификатора 0,5 % от массы вяжущего, наблюдается снижение прочности в ранние сроки в сравнении с бетоном без добавок шлака. Однако в возрасте 28 суток прочность бетонов превышает значение 80 МПа, чем немного уступает бетону на основе традиционного цемента. Так же установлено, что применение шлака позволяет снизить усадку бетона с 0,6 до 0,1–0,45 мм/м [23].

В работе Иванова И.М. [24] предложена математическая модель по подбору состава для изготовления высокоэффективного бетона на основе доменных шлаков при задании конечной прочности бетона и срока его твердения. На основании этой модели сделан вывод об отсутствии необходимости в снижении процентного содержания шлака в цементе менее чем на 24 % вследствие того, что прочность как на начальном этапе твердения, так и в более поздние сроки снижается незначительно.

В условиях жаркого и влажного климата, характерного для Вьетнама и Индии предлагается использование поливинилхлорида (ПВХ) и доменного шлака для изготовления так называемого «зеленого» геополимерного бетона [25]. При заданном содержании доменного гранулированного шлака 30 % и ПВХ до 15 % происходит улучшение удобоукладываемости по сравнению с обычным бетоном, а также улучшение прочностных характеристик. Возможно частичное замещение золы уноса (ЗУ) на диоксид титана TiO_2 в бетоне, содержащем 50/50 ЗУ и доменный гранулированный шлак, с применением различных щелочных добавок [26]. При замещении золы уноса до 3 % механические свойства бетона улучшались с течением времени. Для увеличения прочностных показателей применяется тепловая обработка при 100°C в течении 6 часов, что повышает прочность на сжатие бетона, состоящего из шлака, золы уноса и золы рисовой лузги, до 60 МПа (почти в 2 раза больше, чем без термообработки) [27].

Доменный шлак также возможно использовать в качестве мелкого заполнителя в бетоне, на 100 % заменяющий речной песок [28]. При переработке гранулированного доменного шлака в мелкий заполнитель частицы шлака низкой плотности и угловатой формы превращаются в песок высокой плотности, отвечающий техническим требованиям.

Основным недостатком использования доменного шлака в строительной отрасли является невозможность полного замещения ими природного материала без потери качества конечного продукта, а также применение небезопасных активирующих добавок при производстве бесклнкерного вяжущего материала и геополимерного бетона.

Применение шлака в дорожном строительстве

Одним из активно развивающихся направлений вторичного использования шлаков является его применение в дорожном строительстве. Он может заменить природные материалы в устройстве каждого конструктивного слоя дорожной одежды (рис. 3), причем как в качестве вяжущего, так и в качестве заполнителя — шлакового щебня.

ДОРОЖНАЯ ОДЕЖДА	ПОКРЫТИЕ	СЛОЙ ИЗНОСА
		ОСНОВНОЙ СЛОЙ ПОКРЫТИЯ
	ОСНОВАНИЕ	ВЕРХНИЙ СЛОЙ ОСНОВАНИЯ
		НИЖНИЙ СЛОЙ ОСНОВАНИЯ
		ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ СЛОЙ ОСНОВАНИЯ
	ГРУНТ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА	

Рисунок 3. Конструктивные слои дорожных одежд

Большая часть доменных шлаков используется в качестве альтернативного заполнителя в слоях дорожных одежд. Требования к шлаку, используемому в качестве щебеночного материала, зависят от конструктивного слоя дорожной одежды. Так при использовании его в качестве заполнителя в основании дороги, шлак должен обладать высокой прочностью на сдвиг и шероховатой поверхностью. При укладке его в подстилающий слой — водоустойчивостью и морозостойкостью [29].

Результаты использования доменного шлака в качестве крупного заполнителя в основании дорожной одежды взамен природных материалов показывают улучшение технических характеристик асфальтобетонных смесей [30]. Так улучшаются показатели водопроницаемости, что позволяет использование таких смесей в регионах с повышенным количеством выпадения атмосферных осадков.

Стоит особое внимание уделить направлению использования доменного шлака в качестве стабилизатора мягкого грунта. Глинистые грунты, характеризующиеся слоистой структурой, активно поглощают и удерживают в себе влагу, что при отрицательных температурах приводит к его пучению. Применение шлака в качестве материала для укрепления грунта и поглощения избыточной влаги показали положительные результаты в исследованиях как российских, так и зарубежных ученых [31; 32].

Для приготовления смесей используют органические и неорганические вяжущие материалы. По ГОСТ 30491-2012 в качестве вяжущего применяются битумные эмульсии и их модификации с обязательной добавкой портландцемента или шлакопортландцемента. Возможно применение доменного шлака и в качестве бесклинкерного вяжущего [33]. Но основной проблемой использования доменного шлака в качестве вяжущего для строительства дорожных одежд является его неустойчивость из-за происходящих в нем распадов. Для его стабилизации требуется дополнительная обработка, что является не всегда экономически эффективной процедурой.

Применение шлака в качестве мелиоранта

На территории Российской Федерации имеются обширные территории с почвами повышенной кислотности. Малое содержание питательных веществ в таких почвах, их физические свойства и структура обуславливают отсутствие устойчивых урожаев даже при

условии использования минеральных удобрений. Основным методом снижения кислотности почв и устранения ее вредного воздействия на растения является ее нейтрализация известкованием [34]. Доменный шлак с модулем основности больше единицы может заменить известковые удобрения для нейтрализации почвы. Исследования показывают, что использование доменного шлака способствует увеличению урожайности (рис. 4) наравне с доломитовой и известковой мукой и не сильно уступает ей по способности изменять pH почвы и осаждают фитотоксичные в сильноокислой среде катионы Al, Mn и Fe [35–37].



Рисунок 4. Урожайность растений на почвах без добавок (control) и на почвах с добавками из доменного шлака (BFS) [38]

Применение доменного шлака возможно и в качестве мелиоранта при рекультивации техногенных массивов. Их применение совместно с минеральными удобрениями и гуминовыми препаратами положительно влияет на всхожесть многолетних трав, увеличивая фитомассу в 4 раза. Рекомендовано использование бобово-злаковых и древесно-кустарниковых культур для рекультивации хранилищ отходов [39].

Однако, результаты исследований показывают нецелесообразность выращивания на металлургических шлаках сельскохозяйственных культур, так как в зависимости от процентного содержания шлака в качестве добавки к почвенному плодородному слою наблюдаются различия во всхожести и проявлении фитотоксичности во времени. Так, количество проросших семян редиса в чистом шлаке было выше, чем в почвах с более низкими концентрациями шлака и даже в чистой почве. Тем не менее, по истечению 2 недель роста у растений редиса, выращенных на чистом шлаке, наблюдались признаки его токсического действия, в то время как у растений, проросших в почвосмесях со шлаком в концентрации 50 % и ниже, фитотоксичность выявлена не была. Для семян овса влияние шлака концентрации 25 % и ниже от почвосмеси не ухудшило и не улучшило условия по сравнению с чистой почвой [40–42].

Доменный шлак имеет потенциал для использования его в качестве добавки при проведении фитостабилизации почв с высоким содержанием тяжелых металлов, нарушенных действием промышленных предприятий. Добавление шлака позволит снизить содержание свинца в почве и повысить эффективность иммобилизации таких металлов, как Cd, Cu, Zn и Cr [38; 43].

Для использования доменного шлака в качестве компонента при рекультивации нарушенных земель предварительно должны быть проведены исследования по установлению степени его фитотоксичности, обусловленной наличием в нем тяжелых металлов, содержание которых не должно превышать предельно-допустимых концентраций.

Выводы

Несмотря на его многотоннажное образование в Российской Федерации используется всего около 10 % рассматриваемых отходов. В этой связи в течение последних десятилетий активно развиваются направления их утилизации с целью повышения экологической безопасности и достижения экономического эффекта.

Наибольшим спросом доменный шлак пользуется в строительном производстве при изготовлении вяжущих материалов — цементов, а также бетонов, в частности, геопалимерных бетонов. Основным недостатком их использования является невозможность полного замещения ими природного материала без потери качества, а также применение небезопасных активирующих добавок при производстве бесклинкерного вяжущего материала.

Вторым направлением по объему использования доменного шлака является дорожное строительство. Доменный шлак может служить как вяжущим материалом при строительстве дорожных одежд, так и заполнителем. Необходимым условием использования доменного шлака в дорожном строительстве является его устойчивость к распадам, морозоустойчивость и влагонепроницаемость.

Применение шлаков в сельском хозяйстве в качестве мелиоранта, для уменьшения ее кислотности и фитостабилизации почвы, до конца не изучено и ограничивается нестабильностью состава шлаков. Применение шлака возможно только при предварительной оценке его фитотоксичности и содержания в нем тяжелых металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pashkevich M.A. Classification and Environmental Impact of Mine Dumps // Assessment, Restoration and Reclamation of Mining Influenced Soils. Academic Press. 2017. P. 1–32.
2. Чукаева М.А., Матвеева В.А., Сверчков И.П. Комплексная переработка высокоуглеродистых золошлаковых отходов // Записки Горного института. Т. 253. С. 97–104.
3. Филатов С.В. и др. Условия доменной плавки с низким содержанием кремния в чугунах // Сталь. 2013. № 8. С. 7–10.
4. Пугин К.Г. Изменение состава твердых отходов черной металлургии в современных условиях // Экология и промышленность России. 2011. № 9. С. 46–49.
5. 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.
6. Бодяков А.Н., Бугряшов Д.В. Актуальные проблемы металлургических шлаков // Образование. Наука. Производство. 2021. С. 1016–1020.
7. Сорокин Ю.В. и др. Стабилизация самораспадающихся шлаков // Сталь. 2015. № 11. С. 52–56.
8. Радыгин Р.В. Показатели качества быстротвердеющего портландцемента и особо быстротвердеющего портландцемента, анализ влияния минералогического состава клинкера и тонкости помола на сульфатостойкость цемента // Colloquium-journal. 2019. № 18–3. С. 21–22.

9. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Комащенко В.И., Качурин Н.М. Управление свойствами твердеющих смесей при закладке выработанного пространства рудных месторождений // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 285–292.
10. Крутилин А.А. и др. Исследование влияния ввода шлака при помолле клинкера на прочностные характеристики получаемого цемента в условиях АО «Себряковцемент» // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 2. С. 46–52.
11. Евченко К.А. Зависимость прочностных характеристик шлакопортландцемента от наличия доменного шлака // XI Международный молодежный форум "Образование. Наука. Производство". 2019. С. 1109–1113.
12. Крамар Л.Я., Иванов И.М. Быстротвердеющий, высокопрочный и морозостойкий бетон на основе шлакопортландцемента // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Т. 21. № 1. С. 48–53.
13. Пугин К.Г., Юшков Б.С. Ресурсосберегающие технологии и снижение экологической нагрузки при производстве бетонных изделий с использованием доменных шлаков // Технологии бетонов. 2012. № 1–2. С. 52–55.
14. Артамонова А.В., Воронин К.М. Шлакощелочные вяжущие на основе доменных гранулированных шлаков центробежно-ударного измельчения // Цемент и его применение. 2011. № 4. С. 108–113.
15. Урханова Л.А., Дмитриев И.А. Шлакощелочные вяжущие-перспективное направление стройиндустрии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 5(64). С. 85–89.
16. Дудников А.Г., Дудникова М.С., Реджани А. Геополимерный бетон и его применение // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2018. № 1–2. С. 38–45.
17. Nematollahi B., Sanjayan J., Shaikh F.U. A. Synthesis of heat and ambient cured one-part geopolymer mixes with different grades of sodium silicate // *Ceramics International*. 2015. V. 41. № 4. P. 5696–5704.
18. Калмыкова Ю.С. Переработка отвальных доменных шлаков с получением шлакощелочных вяжущих // Экология и промышленность России. 2014. № 3. С. 21–25.
19. Yang K.H. et al. Properties of cementless mortars activated by sodium silicate // *Construction and building materials*. 2008. V. 22. № 9. P. 1981–1989.
20. Abdalqader A., Al-Tabbaa A. Sustainable binder based on sodium carbonate-activated fly ash/slag and reactive magnesia // 2015 International Concrete Sustainability Conference. National Ready Mixed Concrete Association. 2015. P. 1–15.
21. Dong M., Elchalakani M., Karrech A. Development of high strength one-part geopolymer mortar using sodium metasilicate // *Construction and Building Materials*. 2020. V. 236. P. 1–13.
22. Кононова О.В. и др. Эффективность применения доменного гранулированного шлака в бетонах с добавкой на основе поликарбоксилатного эфира // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 6–2. С. 259–263.

23. Коровкин М.О., Короткова А.А., Ерошкина Н.А., Саденко С.М. Влияние доменного гранулированного шлака на свойства мелкозернистого самоуплотняющегося бетона // Инженерный вестник Дона. 2021. № 8(80). С. 486–494.
24. Иванов И.М., Крамар Л.Я. Математическая модель для назначения высокоэффективного состава бетона с использованием молотого гранулированного доменного шлака // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Т. 20. № 4. С. 28–41.
25. Manjunatha M., Dinesh S., Balaji K., Bharath A. Engineering properties and environmental impact assessment of green concrete prepared with PVC waste powder: A step towards sustainable approach // Case Studies in Construction Materials. 2022. V. 17. P. 1–19.
26. Jagadesh P., Nagarajan V., Karthik prabhu T., Karthik A. K. Effect of nano titanium di oxide on mechanical properties of fly ash and ground granulated blast furnace slag based geopolymer concrete // Journal of Building Engineering. 2022. V. 61. P. 105–235.
27. Лам Т.В., Хунг Н.С., Зиен В.К., Булгаков Б.И., Баженова С.И., Александрова О.В. Геополимерный бетон с использованием многотоннажных техногенных отходов // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. № 2. С. 17–37.
28. Kumar D.S, Kumar P., Sah R., Kaza M. Converting granulated blast furnace slag into fine aggregate // International Journal of Civil Engineering Research. 2016. V. 7. № 2. P. 91–103.
29. Левкович Т.И., Мащенко Т.В., Мевлидинов З.А., Синявский Р.С. Об утилизации шлаков и освобождении занятых городских территорий промышленных зон с использованием шлака в дорожном строительстве // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2017. № 4. С. 113–122.
30. Diaz-Piloneta M., Terrados-Cristos M., Alvarez-Cabal J.V., Vergara-Gonzalez E. Comprehensive Analysis of Steel Slag as Aggregate for Road Construction: Experimental Testing and Environmental Impact Assessment // Materials. 2021. V. 14. P. 1–18.
31. Соловьева В.Я., Сахарова А.С., Еремеев Е.Г. Инновационные способы подготовки основания транспортных магистралей с использованием техногенных образований металлургического производства // Инновационные транспортные системы и технологии. 2022. Т. 8. № 2. С. 28–42.
32. Ding G., Xu J., Wei Y., Chen R., Li X. Engineered reclamation fill material created from excavated soft material and granulated blast furnace slag // Resources, Conservation and Recycling. 2019. V. 150. P. 1–7.
33. Банул А.В., Соловьев Л.Ю., Ткачев Б.В., Борисовская Н.Е. Применение в дорожном и транспортном строительстве новых шлакощелочных бетонов // Потенциал современной науки. 2015. № 5. С. 33–39.
34. Нурлыгаянов Р.Б. и др. Известкование кислых почв: прошлое и настоящее // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2021. № 1. С. 34–41.

35. Литвинович А.В., Небольсина З.П., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Ковлева А.О., Кузёмкин И.А. Некоторые результаты изучения мелиоративных свойств тонкодисперсных фракций доломитовой муки и доменного шлака Череповецкого металлургического комбината // *Агрофизика*. 2013. № 2. С. 44–51.
36. Осипов А.И. История и практические аспекты известкования кислых почв в России // *Агрохимический вестник*. 2019. № 3. С. 28–36.
37. Ghisman V., Muresan A.C., Buruiana D.L., Axente E.R. Waste slag benefits for correction of soil acidity // *Scientific Reports*. 2022. V. 12(1). P. 1–9.
38. Radziemska M., Dzięciol J., Gusiatin Z. M., Bęś A., Sas W., Gluchowski A., Brtnicky M. Recycling of Blast Furnace and Coal Slags in Aided Phytostabilisation of Soils Highly Polluted with Heavy Metals // *Energies*. 2021. V. 14(14). P. 1–11.
39. Беланов И.П., Наумова Н.Б., Семина И.С., Савенков О.А. Шлаки металлургического производства — перспективный материал для рекультивации техногенных отходов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2019. Т. 61. № 12. С. 987–992.
40. Беланов И.П., Савенков О.А., Наумова Н.Б. Фитотоксичность почвосубстратов на основе шлаков металлургического производства, используемых в рекультивации // *Почвы и окружающая среда*. 2018. Т. 1. № 2. С. 67–79.
41. Alekseenko V.A. Geochemical Barriers for Soil Protection in Mining Areas // *Assessment, Restoration and Reclamation of Mining Influenced Soils*. P. 255–274.
42. Matveeva V., Lytaeva T., Danilov A. Application of steel-smelting slags as material for reclamation of degraded lands // *Journal of Ecological Engineering*. V. 19(6). P. 97–103.
43. Петрова Т.А., Рудзиш Э. Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов. *Записки Горного института*. 2021. Т. 251. С. 767–776.

Pashkevich Mariya Anatolievna

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: mpash@spmi.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7020-8219>

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=405611

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57188568215>

Web of Science: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/D-4761-2014>

Kulikova Yuliya Alekseevna

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: yuliyakulikova1997@mail.ru

Current trends in blast furnace waste management

Abstract. The intensive development of industrial production has a harmful effect on the environment, causing its transformation. Among industries, special attention is paid to ferrous metallurgy, the main impact of which are represented by gas and dust emissions, slag, sludge and by-products of coke production. Blast furnace slag is a by-product of iron smelting. In a blast furnace by mixing iron ore, flux and fuel in the form of coke. Despite of its large-tonnage formation, only about 10 % of the considered waste is used in the Russian Federation. In this regard, over the past decades, ways of their utilization have been actively developed in order to increase environmental safety and achieve an economic effect. The greatest demand for blast-furnace slag is observed in its use in the production of concrete and in the design of sidewalks. The use of blast-furnace slag as ameliorants in the reclamation of technogenic disturbed lands has not been fully studied and has a number of its own characteristics. The article discusses the main directions of the reuse of blast-furnace slag in Russian and foreign practice, assessments the positive and negative aspects of its use in a particular industry. The main disadvantage of its use in the production of concrete is the impossibility of its complete replacement of natural material without loss of quality, as well as the use of unsafe activating additives in the production of clinker-free binder material. A necessary condition for the use of blast-furnace slag in road construction is its resistance to decay, frost resistance and moisture resistance. The use of slag in agriculture is possible only with a preliminary assessment of its phytotoxicity and the content of heavy metals.

Keywords: waste from metallurgical production; blast-furnace slag; construction industry; portland slag cement; geopolymer concrete; road construction; reclamation of technogenically disturbed lands