

УДК 669.054.8

Переработка отходов металлургической промышленности для стабилизации и укрепления проблемных грунтов

И. М. Печенцов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Печенцов И. М. Переработка отходов металлургической промышленности для стабилизации и укрепления проблемных грунтов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 811–819. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-811-819

Аннотация

Цель: Рассмотреть существующие способы переработки и утилизации отходов металлургической промышленности, раскрыть их классификацию. Затронуть негативное воздействия металлургической промышленности, в частности образующихся отходов от их деятельности на геосистемы. Показать технологическое решения проблемы слабых грунтов, с помощью первоначальной их стабилизации и последующим укреплением данных грунтов, для объектов городской инфраструктуры Российской Федерации. **Методы:** Разработаны различные технологии комплексной переработки твердых отходов металлургии, часть из них реализована в промышленном масштабе за рубежом. У нас такие технологии разрабатываются на уровне исследовательских работ и полупромышленных испытаний. **Результаты:** Отличительная особенность грунтов, укрепленных твердыми отходами металлургии, состоит в том, что структурообразование и набор прочности происходит как в воздушно-сухой, так и во влажной средах. Данными отходы эффективно укрепляют грунты разного гранулометрического и химико-минералогического состава. Как показали лабораторные исследования и опорное строительство, грунты, укрепленные данными комплексными отходами, пригодны для устройства конструктивных слоев дорожных одежд. При укреплении песчаных грунтов происходит чисто механическое пронизывание и обволакивание грунтовых частиц (ввиду малого количества глинистых частиц) без образования прочной пространственной структуры. **Практическая значимость:** Показана возможность применения отходов металлургического производства для укрепления слабых грунтов, указанные новые методики могут быть рекомендованы к практическому использованию.

Ключевые слова: Металлургические предприятия, доменный шлак, переработка, вторичные материальные ресурсы, техногенный отход, глинистые грунты, устойчивость.

В настоящий момент направление крупной и средней металлургической промышленности занимает 2-е место по вредным выбросам в атмосферу в России. Производственные мощности крупных металлургических заводов при обработке металла и металлических болванок (расплавленных металлических заготовок) находятся в безвыходном положении в связи с использованием сырья с очень ограниченным содержа-

нием полезных компонентов. По этой причине на металлургические производства поступает очень большой объем руды для переработки в готовые изделия (выпускаемый продукт), а это, соответственно, образует большое количество отходов, в том числе продуктов вторичного производства, например, таких как шлаки и отходящий газ из неиспользуемых компонентов. Таким образом, нанесение вреда через загрязнение атмосферы



Рис. 1. Процесс сброса отходов металлургического производства на открытый полигон

(воздуха) и растительного слоя (почвы) является одной из главных причин экологических проблем, возникающих от деятельности крупной и средней металлургической промышленности. Сточные выбросы с металлургических производств по сточным трубам и системам ливневой канализации с открытых площадок складирования отходов приводят к тому, что загрязняется почва (плодородный растительный слой) и образуются техногенные пустоши вокруг периметра крупных заводов и металлургических производств. По этой причине пагубное воздействие получают от деятельности металлургических производств не только воздух, но также вода и почва [1].

На рис. 1 представлен выброс отходов металлургического производства на открытый полигон (отвал).

Сохраняет свою значимость на сегодняшний день проблема переработки, хранения и утилизации отвальных шлаков, а также выработки из них металлокомпонентов при запуске по новому

технологическому кругу как вторичное сырье. По данной проблеме выделим несколько аспектов. **Первый** — металл, извлеченный из отхода металлургического производства — шлака, более экономически выгодный, чем извлеченный из руды в результате длинного ряда производственной последовательности. **Второй** — после выплавки металлов из шлака, оставшиеся компоненты можно с пользой утилизировать [2].

В целом все образующиеся основные отходы делятся на два вида: **основные** и **негативные**.

Основные — это отходы от компонентов и материалов для производственной и промышленной инфраструктуры, используемых чаще всего при создании и изготовлении товаров, таких как металлы в чистом виде (без примесей), металлосодержащие (окалина, шламы, шлаки и пр.) и неметаллические (текстиль, пластик, полимеры, резина, древесина, клеи, стекло и др.) отходы.

К **негативным** отходам можно отнести строительные, машиностроительные материалы и



Рис. 2. Отходы металлургического производства — шлак

вещества для промышленного производства, используемые или образующиеся при технологических процессах, являющиеся побочным этапом. Негативные отходы бывают твердые (огнеупоры, золы, абразивы и т. д.), жидкие (смазочно-охлаждающие) жидкости, минеральные (полусинтетические и синтетические) масла и другие подобные по составу нефтепродукты, отходы гальванопроизводства и газообразные (отходящие газы, летучие химические элементы).

Особенно значимо комплексное применение сырья для промышленных металлургических и машиностроительных отраслей, таких как металлургия черных металлов, заводы по выпуску тяжелой техники для строительной отрасли и гражданского назначения, где в процессе обработки (выплавки) металлов, таких как сталь, чугун, нержавеющая сталь, и ферросплавов, возникает значительное количество **технологических отходов** [3]. Из этих остаточных материалов технологического производства 80 % составляют **шлаки** из флюсов, зол топлива и продуктов, окисляющих металл и примеси.

На рис. 2 представлены отходы металлургического производства, а именно шлаки.

С учетом «Временного классификатора токсичных отходов промышленного производства и методических рекомендаций по определению класса токсичности промышленных отходов»

от 1987 г. подобные отходы делятся на **4 класса опасности** [4]:

– **1-й класс опасности отходов (чрезвычайно опасные)**: электрические трансформаторы, ртутные лампы, градусники, в основном эти отходы образованы от промышленности;

– **2-й класс опасности отходов (высокоопасные)**: аккумуляторы свинцовые, кабели медно-жильные, батарейки;

– **3-й класс опасности отходов (умеренно опасные)**: автомобильные отработанные масла и масляные фильтры, обрезки оголенных проводов (медных и т. д.);

– **4-й класс опасности отходов (малоопасные)**: строительный мусор, автомобильные резиновые покрышки, древесные опилки, бой керамического кирпича, обрезки картона и другие отходы [5].

На рис. 3 указаны основные виды образующихся промышленных отходов на комбинатах и предприятиях Российской Федерации.

В настоящее время на предприятиях черной и цветной металлургии для металлопроизводства [6] расположены такие направления, как: прямое технологическое производство проката и металлозаготовок, прессозоны (кузны промышленные), плавильные и прокатные производства. Данные производства являются источниками для загрязнения водоемов и воздуха.

При выплавке и выработке металлов образуются отходы, утилизация которых в настоящий момент является острой проблемой для окружающей среды. Так, в металлоотходах находится очень большое количество вредных и токсических химических веществ. Поэтому тонны металлургических отходов, число которых составляет миллиарды, представляют собой очень большую экологическую проблему в стране.

Отработанные остатки от металлургической промышленности перерабатываются. Однако перерабатываются эти отходы не полностью —



Рис. 3. Основные виды образующихся промышленных отходов в Российской Федерации

только из 10–15 % их общей массы добывают полезные элементы. Metallургические отходы также используются для изготовления строительных материалов.

На это приходится примерно 20–30 тонн отходов в сутки. Значительную их часть просто выбрасывают либо в отвалы, либо в поля, которые предназначены для захоронения шламов, или куда-то еще. Увы, нередко местом выброса металлических отходов становится плодородная почва.

Однако опасность металлических отходов не уменьшается, поскольку они могут наносить

вред экологии, даже находясь в 200 км от своего локального расположения. Токсичные вещества способны мигрировать в природную среду на большие расстояния [7].

Среди избыточных отходов черного металла можно отметить, что выработка чугуна, стали приводит к образованию шлаков [8]. Взаимодействие железа раскаленного и кислорода приводит к образованию калия. Кроме того, остатки от металлопроизводства включают замасленные окалины, керамические ломы, шламы. Большинство отходов черного металла находят свое применение путем переработки. Из них происходит

извлечение металлических компонентов, из которых потом можно получить металл.

Шлак, бой футеровки, окалина и пыль — это не весь спектр количества отходов из металла [9].

Если выполнить химический анализ всех отходов, вырабатываемых металлургической компанией, то, скорее всего, обнаружим огромное количество компонентов.

Правильное выполнение переработки дает возможность дальнейшего практического использования доли данных отходов. Но большую их часть складывают в накопители золота.

Одним из не менее значимых компонентов, содержащихся в черных металлах, является цинк, находящийся широкое практическое применение [10]. Количество цинка в отходах настолько велико, что, например, при извлечении всего цинка из пыли газовой очистки, выбрасываемой электростальным цехом ОАО «Северсталь», его будет достаточно, чтобы полностью обеспечить цинковый завод в Челябинской области.

Кроме того, к отходам от металлургической промышленности относятся и цветные металлы. В процессе производства цветного металла образуется отход, который является более серьезной проблемой экологии, чем отход черного металла. Отходы предприятий, занимающихся производством цветного металла, содержат почти полный ассортимент тяжелого металла. К сожалению, неполная утилизация таких отходов не только приводит к неблагоприятной экологической обстановке, но также к потере цветного металла и прочих химических веществ, имеющих важный хозяйственный смысл.

Кроме того, определенную значимость имеет грунтовое основание. Рассмотрим, что представляет собой **грунт**. Это многокомпонентная геологическая структура горных пород, почв, техногенных систем, искусственных грунтов, используемых в качестве основы при строительстве и реконструкции зданий, автодорог, аэродромов, строительстве насаждений и т. д. [11].

В число устойчивых относятся грунты скального происхождения [12]. Они настолько прочные, что не требуют глубины. Такая порода не подвергается вспучиванию и вымытию. Но у них все же есть один недостаток, при этом очень существенный. Скальный грунт характерен для горных районов и не встречается на равнине. Несколько меньше прочности имеют так называемые крупные грунты — валуны, щебень и гравий.

Одним из самых удобных вариантов для строительства по назначению является песчаная грунтовка. Предпочтение следует отдавать крупным пескам и фракциям средних размеров [13]. Они не рвутся при заморозке.

Среди неблагоприятных видов почв следует отметить глинистую и суглинистую. В зависимости от структуры глина очень сильно нагревается водой, что при заморозке дает значительные расширения, способные деформировать фундамент и другие конструкции, расположенные в цокольном этаже капитального строительства. Оттаивание тоже грозит огромными проблемами — в этот период почва проседает и разжижается.

Отдельно взятый вид грунта — лесс. Это осадочные породы светло-желтого цвета. Пока дискуссия идет о супеси или, скорее всего, о суглинке.

Немаловажно, что процесс строительства в большинстве случаев зависит от материала, который используется в качестве грунта. Вследствие чего перед началом строительных работ требуется изучение грунта. В основном встречаются виды песчано-глинистого грунта, которые различны по свойствам физики и механически, а также по величине частей.

Следует отметить зарубежный опыт ученых из Хорватии Ivana Barišić, Sanja Dimter, Ivanka Netinger [14], изучающих вопрос использования шлаков в дорожных строительствах в Хорватии. Дорожное строительство является деятельностью, где больше всего, чем в других отраслевых направлениях строительного производства,



Рис. 4. Разделение шлака по способу охлаждения

используется природный ресурс. Огромное количество природного материала — гравия, камней, песка — вложено в километры недавно возведенных дорог или при реконструировании ветхих магистралей. При этом концепция «устойчивое развитие» требует эффективного контроля за отходами, а также управления окружающей средой. Шлак является отходом, образуемым при очищении металла, его литье и переплавке. В этом процессе шлак формируется в двух этапах. На первом этапе руды подвергаются высоким температурам плавления, чтобы разделить примеси. Полученные примеси собирают и удаляют, а этот отходный материал называется шлаком. При дальнейшем литье и легировании металла в очищенные металлы добавляются разные вещества для плавления металла и его обогащения, а в таких процессах шлак вновь образуется в качестве побочных продуктов.

На рис. 4 отражены типы образующегося шлака в зависимости от способа охлаждения, расплавленной массы и от типа обрабатываемого металла (цветной и черный шлак).

Кристаллические шлаки обладают целлюлозной или пористой структурой в результате формирования газовых пузырьков в расплавленных массах и, как правило, считаются группой агрегатов нормальной массы.

При изготовлении гранулированных шлаков создаются песочные зерна. Благодаря составу материал имеет отличные гидравлические свойства, и если у него есть соответствующий активатор, то гидроксид кальция, например, будет действовать как портландцемент.

Расширенные, или пенные, шлаки более пористые и имеют меньший объем, чем воздушный шлак.

В зависимости от типа обработанного металла шлак подразделяется на два основных типа: цветные шлаки из алюминиевого, феррохромного и ферромарганцевого сплавов и железные шлаки из алюминиевого, ферромарганцевого и латунного сплавов.

Большое количество черного и цветного шлака с металлургических заводов в Сисаке и Сплите расположено на свалках Хорватии, оценивается примерно в 1,8 млн тонн. Большое число такого материала на свалках побудило хорватских ученых провести исследование о возможности применения различного шлака в строительстве [15, 16] в качестве заполнителя в бетонных смесях.

Библиографический список

1. Бабак Н. А. Физическое загрязнение окружающей среды: учебное пособие / Н. А. Бабак, И. А. Горшкова, О. Ю. Макарова и др. — СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2012. — 54 с.

2. Кусков С. В. Полигоны твердых бытовых и промышленных отходов / С. В. Кусков, Л. А. Осипова, Е. Н. Щербакова // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2005. — № 3. — С. 70–75.
 3. Малахов В. М. Городские отходы в России: состояние, проблемы, пути решения / В. М. Малахов, А. Г. Гриценко, С. В. Дружинин // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. — 2012. — № 98. — С. 1–126.
 4. Большая Е. П. Экология металлургического производства: курс лекций / Е. П. Большая. — Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2012. — 155 с.
 5. Сторожаков С. Ю. Пути утилизации ацетатсодержащих отходов в качестве добавок в бетонные смеси / С. Ю. Сторожаков, С. В. Медведько // Наука и образование: архитектура, градостроительство и строительство: материалы Международной конференции, посвященной 80-летию строительного образования и 40-летию архитектурного образования Волгоградской области, Волгоград, 06–10 сентября 2010 года. — Волгоград: Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2010. — С. 331–334.
 6. Линчевский Б. В. Металлургия черных металлов / Б. В. Линчевский — М.: Книга по Требованию, 2021. — 360 с.
 7. Гаврилина А. В. Моделирование оценки затрат металлургического предприятия, связанных с загрязнением окружающей среды / А. В. Гаврилина, Н. В. Долбня // Вестник Академии гражданской защиты. — 2018. — № 2(14). — С. 89–96.
 8. Временный классификатор токсичных промышленных отходов и методические рекомендации по определению класса токсичности промышленных отходов / Министерство здравоохранения СССР; Государственный комитет СССР по науке и технике. — М., 1987.
 9. Шершнева М. В. Геоэкозащитные свойства доменного шлака в дорожном строительстве / М. В. Шершнева, В. Я. Соловьева, Л. Л. Масленникова и др. // Естественные и технические науки. — 2018. — № 9(123). — С. 81–84.
 10. Путилина В. С. Влияние органического вещества на миграцию тяжелых металлов на участках складирования твердых бытовых отходов / В. С. Путилина, И. В. Галицкая, Т. И. Юганова // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. — 2005. — № 76. — С. 1–100.
 11. Печенцов И. М. Обоснование высокоэффективного вяжущего на основе модифицированного металлургического отхода (доменного шлака), с его последующим применением для стабилизации и укрепления проблемных грунтов / И. М. Печенцов, М. С. Абу-Хасан // БСТ: Бюллетень строительной техники. — 2023. — № 3(1063). — С. 22–25.
 12. ГОСТ 25100—2020. Грунты. Классификация (с Изменениями № 1). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174302>.
 13. Соловьева В. Я. Эффективное основание из глинистого грунта для устройства автомобильной дороги / В. Я. Соловьева, М. Абу-Хасан, Н. В. Ершиков и др. // Транспортное строительство. — 2017. — № 11. — С. 26–28.
 14. Barišić I. Possibilities of application of slag in road construction / I. Barišić, S. Dimter, I. Netinger // Tehnički vjesnik: znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku. — 2010. — Vol. 17. — Iss. 4. — Pp. 523–528.
 15. Netinger I. Primjena zgure u graditeljstvu / I. Netinger, D. Bjegović, M. Jelčić et al. // Sabor hrvatskih graditelja / Simović, V. Cavtat: Hrvatski savez građevinskih inženjera, 2008. — Pp. 281–292.
 16. Netinger I. Mogućnosti primjene domaće zgure kao agregata u betonu / I. Netinger, M. J. Rukavina, D. Bjegović // Građevinar. — 2010. — Vol. 62. — Iss. 1. — Pp. 35–43.
- Дата поступления: 10.08.2023
Решение о публикации: 28.09.2023
- Контактная информация:**
ПЕЧЕНЦОВ Илья Михайлович — аспирант;
pechensov1989@gmail.com

Processing of Waste from the Metallurgical Industry for Stabilization and Reinforcement of Problematic Soils

I. M. Pechentsov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Pechentsov I. M. Processing of Waste from the Metallurgical Industry for Stabilization and Reinforcement of Problematic Soils // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 811–819. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-811-819

Summary

Purpose: To examine existing methods of processing and recycling waste from the metallurgical industry, to elucidate their classification. To touch upon the negative impact of the metallurgical industry, in particular, of the waste generated from its activities on geosystems. To present technological solutions for addressing the issue of weak soils through their initial stabilization and subsequent reinforcement, specifically for urban infrastructure objects in the Russian Federation. **Methods:** Various technologies for the complex processing of solid waste from metallurgy have been developed, some of them have been implemented on an industrial scale abroad. We develop such technologies at the level of research and semi-industrial tests. **Results:** A distinctive feature of soils reinforced with solid wastes of metallurgy is that structure formation and strength development occur both in air-dry and in humid environments. These wastes effectively strengthen soils of different granulometric and chemical-mineralogical composition. As shown by laboratory studies and supporting construction, soils reinforced with this complex waste are suitable for constructing pavement structural layers. When strengthening sandy soils, a purely mechanical penetration and enveloping of soil particles (due to the small amount of clay particles) occurs without the formation of a strong spatial structure. **Practical significance:** The possibility of using waste from metallurgical production to strengthen weak soils is shown, and these new methods can be recommended for practical use.

Keywords: Metallurgical enterprises, blast-furnace slag, processing, secondary material resources, technogenic waste, clay soils, stability.

References

1. Babak N. A., Gorshkova I. A., Makarova O. Yu. et al. *Fizicheskoe zagryaznenie okruzhayushchey sredy: uchebnoe posobie* [Physical pollution of the environment: textbook]. St. Petersburg: Peterburgskiy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2012, 54 p. (In Russian)
2. Kuskov S. V., Osipova L. A., Shcherbakova E. N. Poligony tverdykh bytovykh i promyshlennykh otkhodov [Landfills for solid household and industrial waste]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University]. 2005, Iss. 3, pp. 70–75. (In Russian)
3. Malakhov V. M., Gritsenko A. G., Druzhinin S. V. Gorodskie otkhody v Rossi: sostoyanie, problemy, puti resheniya [Urban waste in Russia: state, problems, solutions]. *Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzоров mirovoy literatury* [Ecology. A series of analytical reviews of world literature]. 2012, Iss. 98, pp. 1–126. (In Russian)
4. Bol'shina E. P. *Ekologiya metallurgicheskogo proizvodstva: kurs lektsiy* [Ecology of metallurgical production: a course of lectures]. Novotroitsk: NF NITU "MISiS", 2012, 155 p. (In Russian)
5. Storozhakov S. Yu., Medved'ko S. V. *Puti utilizatsii atsetatsoderzhashchikh otkhodov v kachestve dobavok v betonnye smesi. Nauka i obrazovanie: arkhitektura, gradostroitel'stvo i stroitel'stvo: materialy Mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu stroitel'nogo obrazovaniya i 40-letiyu arkhitekturnogo obrazovaniya*

Volgogradskoy oblasti, Volgograd, 06–10 sentyabrya 2010 goda [Ways of recycling acetate-containing waste as additives in concrete mixtures. Science and education: architecture, urban planning and construction: materials of the International conference dedicated to the 80th anniversary of construction education and the 40th anniversary of architectural education in the Volgograd region, Volgograd, September 06–10, 2010]. Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet Publ., 2010, pp. 331–334. (In Russian)

6. Linchevskiy B. V. *Metallurgiya chernykh metallov* [Metallurgy of ferrous metals]. Moscow: Kniga po Trebovaniyu Publ., 2021, 360 p. (In Russian)

7. Gavrilina A. V., Dolbnya N. V. Modelirovanie otsenki zatrat metallurgicheskogo predpriyatiya, svyazannykh s zagryazneniem okruzhayushchey sredy [Modeling the assessment of costs of a metallurgical enterprise associated with environmental pollution]. *Vestnik Akademii grazhdanskoj zashchity* [Bulletin of the Academy of Civil Protection]. 2018, Iss. 2(14), pp. 89–96. (In Russian)

8. *Vremennyy klassifikator toksichnykh promyshlennykh otkhodov i metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu klassa toksichnosti promyshlennykh otkhodov. Ministerstvo zdravookhraneniya SSSR; Gosudarstvennyy komitet SSSR po nauke i tekhnike* [Temporary classifier of toxic industrial waste and guidelines for determining the toxicity class of industrial waste. Ministry of Health of the USSR; USSR State Committee for Science and Technology.]. Moscow, 1987. (In Russian)

9. Shershneva M. V., Solov'eva V. Ya., Maslennikova L. L. Geokozashchitnye svoystva domennogo shlakav dorozhnom stroitel'stve [Geo-environmental properties of blast furnace slag in road construction]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and technical sciences]. 2018, Iss. 9(123), pp. 81–84. (In Russian)

10. Putilina V. S., Galitskaya I. V., Yuganova T. I. Vliyanie organicheskogo veshchestva na migratsiyu tyazhelykh metallov na uchastkakh skladirovaniya tverdykh bytovykh otkhodov [Influence of organic matter on the migration of heavy metals in areas where municipal solid waste is stored].

Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzorov mirovoy literatury [Ecology. A series of analytical reviews of world literature]. 2005, Iss. 76, pp. 1–100. (In Russian)

11. Pechentsov I. M., Abu-Khasan M. S. Obosnovanie vysokoeffektivnogo vyazhushchego na osnove modifitsirovannogo metallurgicheskogo otkhoda (domennogo shlaka), s ego posleduyushchim primeneniem dlya stabilizatsii i ukrepleniya problemnykh gruntov [Justification of a highly effective binder based on modified metallurgical waste (blast furnace slag), with its subsequent use for stabilization and strengthening of problematic soils]. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki* [BST: Construction Bulletin technology]. 2023, Iss. 3(1063), pp. 22–25. (In Russian)

12. *GOST 25100—2020. Grunty. Klassifikatsiya (s Izmeneniyami № 1)* [GOST 25100—2020. Soils. Classification (with Changes № 1)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200174302>. (In Russian)

13. Solov'eva V. Ya., Abu-Khasan M., Ershikov N. V. et al. Effektivnoe osnovanie iz glinistogo grunta dlya ustroystva avtomobil'noy dorogi [Effective base of clay soil for the construction of a highway]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction]. 2017, Iss. 11, pp. 26–28. (In Russian)

14. Barišić I., Dimter S., Netinger I. Possibilities of application of slag in road construction. *Tehnički vjesnik: znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku*. 2010, vol. 17, Iss. 4, pp. 523–528.

15. Netinger I., Bjegović D., Jelčić M. et al. Primjena zgure u graditeljstvu. *Sabor hrvatskih graditelja / Simović, V. Cavtat: Hrvatski savez građevinskih inženjera*, 2008, pp. 281–292.

16. Netinger I., Rukavina M. J., Bjegović D. Mogućnosti primjene domaće zgure kao agregata u betonu. *Građevinar*. 2010, vol. 62, Iss. 1, pp. 35–43.

Received: August 10, 2023

Accepted: September 28, 2023

Author's information:

Il'ya M. PECHENTSOV — Postgraduate Student;
pechensov1989@gmail.com