

## В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ



УДК 691.33.002.3

А.Т. ПИМЕНОВ, В.С. ПРИБЫЛОВ

### ВОВЛЕЧЕНИЕ ОТХОДОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В ПРОИЗВОДСТВО СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Показана возможность применения сталеплавильных шлаков металлургических предприятий в качестве заполнителя при производстве строительных материалов: сухих строительных смесей, цементных бетонов, шлакоасфальтобетонов. Методология исследований основана на разработанных ранее технологических схемах рециклинга металлургических шлаков в виде системного комплекса этапов работ, с чем связана необходимость последовательной трансформации их свойств посредством всестороннего воздействия на исследуемый материал. На основе механически обработанного конвертерного шлака получены составы растворных смесей, соответствующих маркам М10 П<sub>к2</sub>, М25 П<sub>к2</sub>, М100 П<sub>к2</sub>; М150 П<sub>к2</sub> по ГОСТ 31357–2007. На основе мартеновского шлака фракционированного состава запроектирована бетонная смесь, соответствующая тяжелому бетону класса по прочности на сжатие не ниже В25 и марки по удобоукладываемости П4 по ГОСТ 7473–2010 и ГОСТ 26633–2015. С использованием фракционированных мартеновского и конвертерного шлаков подобраны составы шлакоасфальтобетонных смесей, соответствующих ГОСТ 9128–2013.

**Ключевые слова:** отходы черной металлургии, сталеплавильные шлаки, бетоны, сухие строительные смеси, асфальтобетонные смеси.

DOI 10.32683/0536-1052-2021-748-4-114-120

**Введение.** Анализ практики утилизации отходов металлургического производства показывает положительные результаты применения их в качестве сырья для приготовления строительных смесей различного функционального назначения. Отходы металлургических предприятий уже прошли термическую обработку, что определило формирование в них кристаллических и аморфных структур, которые, в свою очередь, оказывают влияние на развитие процессов гидратации [11, 12]. При этом отсутствие органических примесей в составе техногенного сырья предоставляет возможность их вторичного использования в строительной отрасли [3–5].

Целью данной работы является разработка новых методов использования сталеплавильных шлаков при производстве строительных материалов.

© Пименов А.Т., Прибылов В.С., 2021

**Материалы и методы.** На базе лаборатории НГАСУ (Сибстрин) разработаны концептуальные подходы [6] применения металлургических сталеплавильных шлаков в строительной отрасли. Структура технологий утилизации – рециклинга металлургических шлаков включает согласованные по видам деятельности этапы производства, совокупность которых образует систему мероприятий по утилизации отходов, как необходимого и востребованного вторичного продукта на рынке строительных материалов. Выделены следующие основные этапы: изучение состава, структуры и физико-механических свойств металлургических шлаков с последующим определением принципиальных путей их применения; прогнозирование физико-механических свойств и установление частных путей использования металлургических шлаков при производстве строительных материалов.

В качестве объекта исследования были выбраны сталеплавильные шлаки Новокузнецкого металлургического комбината (мартеновский, конвертерный, печь-ковш), которые хранились в отвалах в условиях меняющихся воздействий температуры и влажности. Физико-механические свойства шлаков изучали на базе испытательной лаборатории кафедры строительных материалов, стандартизации и сертификации НГАСУ (Сибстрин). Применяемые для испытаний средства измерений и лабораторное оборудование были поверены, откалиброваны и аттестованы согласно действующим требованиям. Исследование основных физико-механических свойств металлургических шлаков проводили стандартными методами и средствами, позволяющими обеспечить требуемую точность измерений.

**Результаты исследования и их анализ.** Анализ химического состава мартеновского и конвертерного сталеплавильных шлаков показывает их основную природу: величины отношения  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  равны 1,6 и 1,8 для мартеновского и конвертерного шлаков соответственно (рис. 1). В исследуемых шлаках присутствуют одноименные с составом клинкера элементы – кремний, кальций, железо и др., возможно, в виде  $\text{SiO}_2$ , а также  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (алит),  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (белит) и др. Структура алита может быть модифицирована за счет размещения в кристаллизационной решетке ионов  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ . Известно, что  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  активно вступает в реакции гидратации, оказывая влияние на процессы структурообразования, формирования прочности цементного камня.

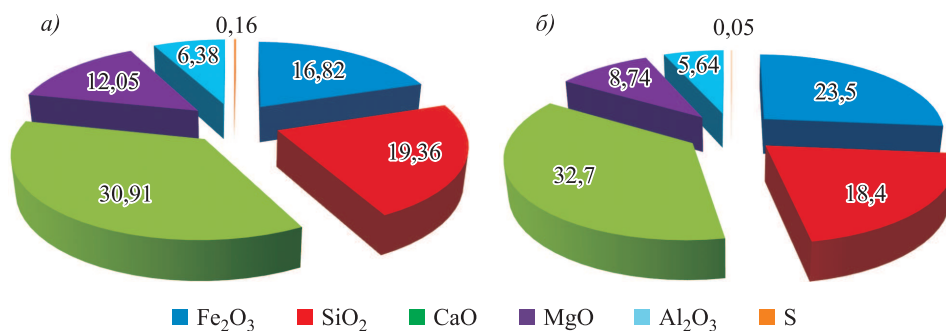


Рис. 1. Химический состав мартеновского (а) и конвертерного (б) шлака

Однако применение сталеплавильных шлаков в качестве активной минеральной добавки к вяжущим технологически возможно при существенном (не менее 60 %) повышении содержания ионов  $\text{Ca}^{2+}$  [1–3, 7, 8]. В этой связи целесообразно модифицировать составы сталеплавильных шлаков по направлению повышения их основности уже на этапе выпуска из зоны плавления путем кальцинирования – введения добавок известняка  $\text{CaCO}_3$ . При выпуске шлаков температура металлов составляет около 1600 °С, а известняка, как известно, разлагается уже при температуре около 900 °С. Оксид кальция  $\text{CaO}$ , находясь в неустойчивом состоянии, образует силикаты кальция разной степени основности. Модификации состава сталеплавильных шлаков приближают их к портландцементному клинкеру, что определяет их свойства как гидравлического вяжущего, а в смеси с цементом способствует формированию специальных свойств бетонов [9–11].

В результате практических экспериментов на основе механически обработанного конвертерного шлака были получены составы растворных смесей, соответствующие маркам М10 Пк2, М25 Пк2, М100 Пк2; М150 Пк2 по ГОСТ 31357–2007 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия».

На основе мартеновского шлака фракционированного состава запроектирован состав бетонной смеси (расчет на 1 м<sup>3</sup>):

шлак фракции 20–40 мм 783 кг;  
шлак фракции 5–10 м 638 кг;  
песок (шлаковый) 657 кг;  
портландцемент ЦЕМ II/A-Ш 32,5Б 382 кг;  
вода 191 л;  
суперпластификатор на основе эфира поликарбоксилата 2,2 кг.

Удобоукладываемость запроектированной бетонной смеси определяли по ГОСТ 10181–2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний». Осадка конуса составила 20 см, что соответствует марке по подвижности П4 ГОСТ 7473–2010 «Смеси бетонные. Технические условия». Плотность состава бетонной смеси 2654 кг/м<sup>3</sup>. В возрасте 28 сут средние показатели предела прочности на сжатие составили 34,18 МПа, что соответствует тяжелому бетону класса по прочности не ниже В25 по ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия».

Кроме того, используя фракционированные мартеновский и конвертерный сталеплавильные шлаки, подобраны составы шлакоасфальтобетонных смесей, соответствующих ГОСТ 9128–2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия» (битум в 100 % смеси), %:

шлак мартеновский смеси фракций 5–20 мм 39,05;  
шлак конвертерный фракции 0–5 мм (песок шлаковый) 42,86;  
шлак печь-ковш 12,38;  
битум нефтяной дорожный вязкий 5,71.

<sup>1</sup> ОДМ 218.3.087–2017. Отраслевой дорожный методический документ. Рекомендации по применению асфальтобетонных смесей на основе металлургических шлаковых материалов для условий Центрального федерального округа (Распоряжение Росавтодора от 20.04.2017 N744-р).



Рис. 2. Сравнение показателей физико-механических свойств асфальтобетонных смесей

Проектирование составов асфальтобетонной смеси осуществлялось с учетом обеспечения максимальной плотности и минимальной пористости минерального каркаса образцов по предельным кривым ГОСТ 9128–2013. Отличие по величине водонасыщения от шлаковых материалов по ОДМ 218.3.087-2017<sup>1</sup> связано с необходимостью формирования закрытой замкнутой системы пор в образцах органоминеральной смеси с остаточной пористостью, не превышающей 2,5–5,0 % для плотных смесей. Для пористых шлаковых асфальтобетонов, предполагаемых для устройства нижних слоев покрытий и оснований, рекомендуется ограничивать данную величину 8–15 %.

Фактические показатели физико-механических свойств шлакоасфальтобетона на примере плотной шлакоасфальтобетонной смеси соответствуют физико-механическим свойствам мелкозернистой плотной асфальтобетонной смеси типа Б марки II (рис. 2). Анализ результатов свидетельствует, что шлакоасфальтобетонные смеси и шлакоасфальтобетон по основным показателям соответствуют действующим требованиям, а по отдельным показателям, характеризующим эксплуатационную работу материала – прочность при 50 °С, сдвигоустойчивость и трещиностойкость, превышают их в 1,3–1,9 раза.

**Заключение.** Результаты исследований показывают, что сталеплавильные шлаки металлургических предприятий целесообразно использовать при производстве сухих строительных смесей, бетонов, а также в качестве запол-

нителя минерального каркаса асфальтобетонной смеси и шлакоасфальтобетона, что способствует улучшению его эксплуатационных характеристик в условиях интенсивной транспортной нагрузки и резко континентального климата. Более того, повышение долговечности асфальтобетонной смеси и шлакоасфальтобетона позволяет сократить себестоимость таких смесей по сравнению с традиционными, вследствие применения в их составе отходов промышленного производства [12]. Сталеплавильные шлаки могут стать заменой для природных строительных материалов при приготовлении и укладке асфальтобетонных смесей на городских улицах и дорогах различных классов и категорий. Себестоимость и запасы шлаков позволят строить устойчивые к динамическим нагрузкам и знакопеременным температурам дорожные покрытия при сравнительно меньших материальных затратах: стоимость материала при использовании шлаков из карьеров в среднем на 10–25 % (в зависимости от фракционного состава) выше по сравнению со сталеплавильными [13].

В целом рассматриваемые шлаковые материалы не оказывают пагубного воздействия на окружающую природную среду, по комплексу эксплуатационных свойств соответствуют действующим требованиям, а потому составляют важнейший материальный резерв рационального их использования при производстве строительных смесей различного функционального назначения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вульферт Х., Кейснер М., Людвиг Х., Адамчик Б., Шифферс А. Выходящие компоненты цемента из сталеплавильных шлаков для улучшения экологии и экономики // *Черные металлы*. 2014. Т. 5. № 989. С. 50–56.
2. Shi Caijun. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production // *Cem. and Concr. Res.* 2002. Vol. 32, No. 3. P. 459–462.
3. Шаповалов Н.А., Загороднюк Л.Х., Тикунова И.В., Шекина А.Ю. Рациональные пути использования сталеплавильных шлаков // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 1. С. 439–443.
4. Белецкая В.А., Румянцева Е.Л. Перспективы использования электросталеплавильных шлаков ОЭМК // *Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2011. № 3. С. 140–144.
5. Панковец А.И., Мироевский С.В. Утилизация электросталеплавильных шлаков // *Литье и металлургия*. 2013. Т. 1. № 69. С. 26–27.
6. Пименов А.Т., Барахтенова Л.А., Прибылов В.С. Основы рециклинга отходов металлургии в строительной отрасли // *Инновации в строительстве, энергосберегающие технологии, строительство и сейсмобезопасность зданий и сооружений / Наманганский инженерно-строительный институт*. Наманган, 2019. С. 155–157.
7. Autelitano F. Electric arc furnace slags in cement-treated materials for road construction: Mechanical and durability properties // *Construction and building materials*. 2016. No.113. P. 280–289.
8. Oluwasola E.A. et al. Comparative evaluation of dense-graded and gap-graded asphalt mix incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings // *Journal of cleaner production*. 2016. No. 122. P. 315–325.
9. Духовный Г.С., Лонгвиненко А.А. Вяжущие и бетоны на основе электросталеплавильных шлаков // *Автомоб. дороги*. 2008. № 12. С. 126–128.

10. *Потанов А.А.* Разработка составов и технологии модифицированных мелкозернистых бетонов для наливных полов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2013. 20 с.
11. *Старостина Ю.Л.* Отвальные сталеплавильные шлаки – перспективное сырье для производства ячеистых силикатных бетонов автоклавного твердения // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды. Белгород, 2015. С. 361–366.
12. *Ferreira V.J. et al.* Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment // Journal of cleaner production. 2016. No. 130. P. 175–186.
13. *Пименов А.Т., Барахтенова Л.А., Прибылов В.С.* Применение шлаковых заполнителей в составе асфальтобетона для повышения долговечности дорожных покрытий // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16, № 6. С. 766–779.

**Пименов Александр Трофимович**, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственной архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Прибылов Вячеслав Сергеевич**, асп.

Новосибирский государственной архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 17.03.2021

**Pimenov Alexander Trofimovich**, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Pribylov Vyacheslav Sergeevich**, Post-graduate Student

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **INVOLVEMENT OF FERROUS METALLURGY WASTE IN THE PRODUCTION OF CONSTRUCTION MATERIALS**

The possibility of using steelmaking slags of metallurgical enterprises as a filler in the production of construction materials: dry building mixes, cement concretes, slag-asphalt concrete is shown. The research methodology is based on the previously developed technological schemes for recycling metallurgical slags in the form of a system complex of work stages, which requires a consistent transformation of their properties through a comprehensive impact on the material being studied. On the basis of mechanically processed converter slag, the compositions of mortar mixtures have been developed corresponding to the grades M10 P<sub>k2</sub>, M25 P<sub>k2</sub>, M100 P<sub>k2</sub>; M150 P<sub>k2</sub> in accordance with GOST 31357–2007. On the basis of open-hearth slag of fractionated composition, a concrete mixture corresponding to heavy concrete of the compressive strength class not lower than B25 and the workability grade P4 according to GOST 7473–2010 and GOST 26633–2015. In addition, using fractionated open-hearth and converter slags, the compositions of slag-asphalt concrete mixtures corresponding to GOST 9128–2013 were selected.

**Key words:** ferrous metallurgy waste, steel slags, concrete, dry building mixtures, asphaltic concrete mixtures.

### **REFERENCES**

1. *Wulfert H., Keisner M., Ludwig H., Adamchik B., Schiffers A.* Vysokoreaktsionnyye komponenty tsementa iz staleplavil'nykh shlakov dlya uluchsheniya ekologii i ekonomiki [High-reaction cement components from steels to improve ecology and economics]. Chernyye metally [Black metals]. 2014. Vol. 5, No. 989. Pp. 50–56. (in Russian)



2. *Shi Caijun*. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production. *Cem. and Concr. Res.* 2002. Vol. 32, No. 3. Pp. 459–462.
3. *Shapovalov N.A., Sagorodnyuk L.H., Tikunova I.V., Shekina A.Yu.* Ratsional'nyye puti ispol'zovaniya staleplavil'nykh shlakov [Rational ways of using steels]. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Basic research]. 2013. No.1. Pp. 439–443. (in Russian)
4. *Beletskaya V.A., Rumyantseva E.L.* Perspektivy ispol'zovaniya elektrostaleplavil'nykh shlakov [Prospects for the use of electro steel slag OEMC]. *Vestnik BG TU im. V.G. Shukhova* [Bull. BSSTU]. 2011. No. 3. Pp. 140–144. (in Russian)
5. *Pankovets A.I., Miroevskiy S.V.* Utilizatsiya elektrostaleplavil'nykh shlakov [Recycling of electric steel slags/casting and metallurgy]. *Lit'ye i metallurgiya* [Casting and metallurgy]. 2013. Vol. 1, No. 69. Pp. 26–27. (in Russian)
6. *Pimenov A.T., Barakhtenova L.A., Pribylov V.S.* Osnovy retsiklinga otkhodov metallurgii v stroitel'noy otrasli [Basics of recycling waste in the construction industry]. *Innovatsii v stroitel'stve, energosberegayushchiye tekhnologii, stroitel'stvo i seysmbezopasnost' zdaniy i sooruzheniy* [Innovations in construction, energysaving technologies, construction and seismic safety of buildings and structures]. Namangan, 2019. Pp. 155–157. (in Russian)
7. *Autelitano F.* Electric arc furnace slags in cement-treated materials for road construction: Mechanical and durability properties. *Construction and building materials*. 2016. No. 113. Pp. 280–289.
8. *Oluwasola E.A. et al.* Comparative evaluation of dense-graded and gap-graded asphalt mix incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings. *Journal of cleaner production*. 2016. No. 122. Pp. 315–325.
9. *Dukhovnyy G.S., Longvinenko A.A.* Vyazhushchiye i betony na osnove elektrostaleplavil'nykh shlakov [Knitting and concretes based on electric steels]. *Avtomobil'nye dorogi* [Car roads]. 2008. No. 12. Pp. 126–128. (in Russian)
10. *Potapov A.A.* Razrabotka sostavov i tekhnologii modifitsirovannykh melkozernistykh betonov dlya nalivnykh polov: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of compositions and technology of modified fine-grained concrete for pouring floors: Extended abstract of candidate's thesis]. Volgograd, 2013. 20 p. (in Russian)
11. *Starostina Yu.L.* Otval'nyye staleplavil'nyye shlaki – perspektivnoye syr'ye dlya proizvodstva yacheistykh silikatnykh betonov avtoklavnogo tverdeniya [Waste steels are promising raw materials for the production of oily silicate concretes of autoclave hardening]. *Energo- i resursosberegayushchiye ekologicheski chistyye khimiko-tekhnologicheskiye protsessy zashchity okruzhayushchey sredy* [Energy- and resource – saving environmentally friendly chemical-technological processes of environmental protection]. Belgorod, 2015. Pp. 361–366. (in Russian)
12. *Ferreira V.J. et al.* Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment. *Journal of cleaner production*. 2016. No. 130. Pp. 175–186.
13. *Pimenov A.T., Barakhtenova L.A., Pribylov V.S.* Primeneniye shlakovykh zapolniteley v sostave asfal'tobetona dlya povysheniya dolgovechnosti dorozhnykh pokryty [Application of slag fillers in the asphalt concrete composition for increasing the road coating's durability]. *Vestnik SibADI* [SibADI bull.]. 2019. Vol. 16, No. 6. Pp. 766–77. (in Russian)