



УДК 66.046.581.4:669.054.82

DOI 10.17073/0368-0797-2025-2-179-187



Оригинальная статья

Original article

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ С НИЗКОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ CO₂

О. Ю. Шешуков^{1, 2}✉, М. А. Михеенков^{1, 2}, Д. К. Егиазарьян^{1, 2},
А. М. Михеенков², М. В. Клеоновский², О. В. Матюхин²

¹ Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

² Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

✉ o.j.sheshukov@urfu.ru

Аннотация. В статье приведены результаты анализа механизма образования сталеплавильных шлаков. Показано, что в настоящее время в сталеплавильной отрасли используются два способа рафинирования стали – окислительный и восстановительный. Способ окислительного рафинирования реализуется в конвертерах и дуговых сталеплавильных печах (ДСП) и в первую очередь направлен на извлечение из выплавляемой стали фосфора, а восстановительное рафинирование происходит в агрегате ковш–печь (АКП) и направлено на удаление из стали серы. Особенности этих процессов сказываются на формировании фазового состава сталеплавильных шлаков. В условиях окислительного рафинирования в шлаках ДСП формируются вюстит FeO, магнетит Fe₃O₄, ларнит β-2CaO·SiO₂ и мервинит 3CaO·MgO·2SiO₂, а в условиях восстановительного рафинирования в шлаках АКП формируются майенит 12CaO·7Al₂O₃, периклаз MgO, низкотемпературная модификация двухкальциевого силиката – шеннонит γ-2CaO·SiO₂, CaS и FeO. Из минералов в составе шлаков ДСП и АКП гидравлической активностью обладают майенит 12CaO·7Al₂O₃ и ларнит β-2CaO·SiO₂. На основе теоретического анализа способов формирования сульфатированных гидравлически активных фаз показана возможность придания сталеплавильным шлакам путем помола свойств минеральных вяжущих веществ без их дополнительной термической обработки.

Ключевые слова: шлак АКП, шлак ДСП, фазовый состав, вяжущее, помол, минеральные вяжущие вещества, термическая обработка шлаков, формирование фаз в шлаках

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке ПАО «Трубная металлургическая компания», договор № Н112.210.011/23.

Для цитирования: Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Егиазарьян Д.К., Михеенков А.М., Клеоновский М.В., Матюхин О.В. Особенности формирования фазового состава сталеплавильных шлаков и оценка возможности получения на их основе минеральных вяжущих веществ с низкой генерацией CO₂. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2025;68(2):179–187. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-2-179-187>

PECULIARITIES OF THE PHASE COMPOSITION FORMATION OF STEELMAKING SLAGS AND EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF OBTAINING MINERAL BINDERS WITH LOW CO₂ GENERATION ON THEIR BASIS

O. Yu. Sheshukov^{1,2}✉, M. A. Mikheenkov^{1,2}, D. K. Egiazar'yan^{1,2},
A. M. Mikheenkov², M. V. Kleonovskii², O. V. Matyukhin²

¹ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

✉ o.j.sheshukov@urfu.ru

Abstract. The article presents the results of analysis of steelmaking slags formation. It is shown that currently two methods of steel refining are used in the steelmaking industry – oxidative and reducing. The method of oxidative refining is implemented in electric arc furnaces (EAF), and is primarily aimed at extracting phosphorus from the steel being smelted. Reducing refining is implemented in the ladle-furnace unit (LF) and is aimed at removing sulfur from steel. The features of these processes affect the formation of the phase composition of steelmaking slags. Under conditions of oxidative refining, wustite FeO, magnetite Fe₃O₄, larnite β-2CaO·SiO₂ and merwinite 3CaO·MgO·2SiO₂ are formed in EAF slags, and under conditions of reducing refining in LF slags, mayenite 12CaO·7Al₂O₃, periclase MgO, low-temperature modification of dicalcium silicate – γ-2CaO·SiO₂, CaS and FeO. Of the minerals in the composition of EAF slags and LF slags, mayenite 12CaO·7Al₂O₃ and larnite β-2CaO·SiO₂ have hydraulic activity. Based on the theoretical analysis of the formation of sulfated hydraulically active phases, the possibility of imparting properties of mineral binders to steelmaking slags by grinding without their additional thermal preparation is shown.

Keywords: LF slag, EAF slag, phase composition, binder, grinding, mineral binders, thermal treatment of slags, formation of phases in slags

Acknowledgements: The work was supported by PJSC Pipe Metallurgical Company, contract No. N112.210.011/23.

For citation: Sheshukov O.Yu., Mikheenkov M.A., Egiazar'yan D.K., Mikheenkov A.M., Kleonovskii M.V., Matyukhin O.V. Peculiarities of the phase composition formation of steelmaking slags and evaluation of the possibility of obtaining mineral binders with low CO₂ generation on their basis. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(2):179–187. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-2-179-187>

ВВЕДЕНИЕ

На рубеже XXI века в черной металлургии прошли радикальные изменения. В связи с возросшими требованиями к качеству металлопродукции, при одновременном снижении качества сырья, получили широкое распространение высокоинтенсивная плавка стали в сверхмощных электродуговых печах и способы внепечной обработки стали. Это повлекло за собой изменение структуры шлаков черной металлургии и их качественных характеристик. В прошлом столетии наибольшее распространение в черной металлургии имели конверторный и мартеновский способы производства стали. Формировавшиеся в таких условиях шлаки имели стабильную кристаллическую структуру и их хранение и переработка не вызывали особых проблем. При переработке таких шлаков в товарные продукты использовались преимущественно простейшие способы, состоящие из магнитной сепарации, дробления и классификации по фракциям, с доведением фракционного состава шлаков до требований ГОСТ 3344–83 «Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия» [1].

Условия формирования фазового и химического составов шлаков сталеплавильной отрасли за послед-

нее время существенно изменились. Мартеновский способ производства стали морально устарел и в настоящее время не используется. В современных условиях в сталеплавильной отрасли используются два способа рафинирования стали – окислительный и восстановительный. Окислительное рафинирование реализуется в конвертерных и дуговых сталеплавильных печах (ДСП) и в первую очередь направлено на извлечение из выплавляемой стали фосфора, а восстановительное рафинирование реализуется в агрегате ковш–печь (АКП) и направлено на удаление из стали серы. Специфика этих процессов сказывается на формировании фазового состава сталеплавильных шлаков.

Целью настоящей работы являются анализ особенностей формирования сталеплавильных шлаков в современных условиях производства стали и разработка оптимального способа получения минеральных вяжущих веществ на их основе.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ

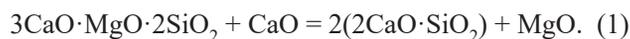
Процессы окислительного рафинирования, реализуемые в конвертерных и электродуговых печах, различаются незначительно и формирующиеся в них

шлаки по фазовому и химическому составу схожи. Для обеспечения успешного протекания окислительного рафинирования в печи в самом начале плавки подается значительное количество обожженной извести CaO. За счет взаимодействия CaO с окалиной металлолома и оксидами железа, образующимися при продувке расплавленной стали кислородом, происходит ассимиляция извести и формирование в шлаке низкоосновной (CaO·Fe₂O₃) и высокоосновной (2CaO·Fe₂O₃) форм феррита кальция. Одновременно, при продувке жидкой стали кислородом, в шлак выходит пентаоксид фосфора (P₂O₅). Кислый оксид SiO₂, попадающий в печь вместе с загрязненным металлоломом, вытесняет амфотерный оксид Fe₂O₃ из феррита кальция, формируя в шлаке две силикатные фазы – двухкальциевый силикат (β-2CaO·SiO₂) и мервинит (3CaO·MgO·2SiO₂). При этом оксиды железа выходят в шлак в виде самостоятельных фаз. Образовавшийся в шлаке двухкальциевый силикат имеет высокотемпературную полиморфную β-модификацию, которая называется ларнит [2]. Формирование ларнита в шлаке сопровождается частичным изоморфным замещением кремнекислородных тетраэдров в молекуле двухкальциевого силиката пентаоксидом фосфора, перешедшим в шлак при продувке стали кислородом. За счет замещения ионов SiO₄⁴⁻ в молекуле двухкальциевого силиката ионами PO₄³⁻ происходит его ионная стабилизация и двухкальциевый силикат при охлаждении не рассыпается. Другая силикатная фаза – мервинит является магний-замещенным аналогом двухкальциевого силиката. Оксид магния образуется за счет частичного разъедания шлаком периклазовой футеровки печи. В результате всех этих процессов формируется окончательный фазовый состав шлака окислительного рафинирования [3], представленный вюститом FeO – 20,4 %, магнетитом Fe₃O₄ – 24,1 %, ларнитом β-2CaO·SiO₂ – 38,15 %, мервинитом 3CaO·MgO·2SiO₂ – 15,9 % и примесями – 1,45 %.

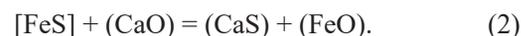
Из печей ДСП и конвертеров сталь поступает в сталеразливочные ковши, где проводится восстановительное рафинирование на АКП. При сливе металла из ДСП или конвертера в сталеразливочный ковш производят максимально полную отсечку шлака. Несмотря на это, часть окислительного шлака попадает в сталеразливочный ковш, формируя шлак на начальной стадии восстановительного рафинирования. Фазовый состав шлака АКП на фазовой диаграмме CaO–SiO₂–Al₂O₃, определенный авторами при изучении способов его стабилизации [2], приведен на рис. 1.

Многие определенные фазы содержат оксид магния, поскольку при формировании фаз использовался не чистый CaO, а модельный шлак, по химическому составу соответствующий типовому шлаку АКП, содержащему около 10 % MgO. Область A на рис. 1 соответствует фазовому составу шлака ДСП, который попал в АКП из сталеразливочного ковша. Поскольку в АКП поддерживаются восстановительные условия, то

оксиды железа, присутствующие в шлаке ДСП, очень быстро восстанавливаются до металлического железа и в области A остаются только две фазы – двухкальциевый силикат (β-2CaO·SiO₂) и мервинит (3CaO·MgO·2SiO₂). Для обеспечения десульфурации в АКП подается обожженная известь (CaO), которая, взаимодействуя с мервинитом, вызывает его распад по реакции



Такой фазовый состав имеет область B на рис. 1. При взаимодействии свободной извести с серой металла происходит реакция



В области B вязкость шлака повышена, что затрудняет процесс десульфурации, поэтому для снижения вязкости в шлак вводится глиноземистый флюс и в области C (рис. 1) формируется окончательный фазовый состав шлака АКП [2], состоящий из майенита (12CaO·7Al₂O₃) – 37,2 %, периклаза (MgO) – 12,5 %, двухкальциевого силиката (α-2CaO·SiO₂) – 41,4 %, ~1 % CaS, остальное FeO. При охлаждении шлака АКП происходят полиморфные преобразования входящего в его состав двухкальциевого силиката [2]. Известно пять полиморфных модификаций двухкальциевого силиката, три из которых являются высокотемпературными (α, α'_n и α'_l модификации) и их последовательные полиморфные преобразования при охлаждении не

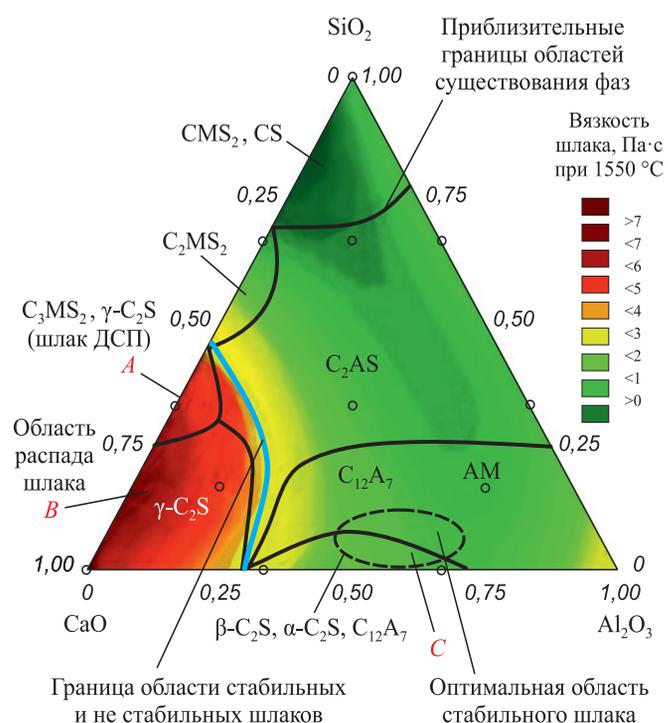


Рис. 1. Фазовый состав шлака АКП [2]

Fig. 1. Phase composition of LF slag [2]

вызывают критических изменений шлака АКП. Критичным является полиморфное превращение ларнита в шеннонит. Ларнит ($\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) является метастабильной модификацией двухкальциевого силиката и при охлаждении шлака ниже $525\text{ }^\circ\text{C}$ медленно переходит в шеннонит ($\gamma\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$). Поскольку истинная плотность ларнита ($\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) составляет $3,28\text{ г/см}^3$, а шеннонита ($\gamma\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) – $2,97\text{ г/см}^3$, такое полиморфное превращение сопровождается увеличением объема шлака на 12 %, приводящее к его рассыпанию на пылевидную фракцию. Вследствие данных процессов в охлажденном шлаке АКП присутствует не ларнит ($\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), а шеннонит ($\gamma\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$).

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Изменившиеся условия формирования шлаков сталеплавильной отрасли и их фазовый состав требуют более серьезного подхода к их переработке с учетом современных достижений в области знаний по формированию фазового состава минеральных вяжущих веществ на основе таких шлаков.

В связи с ужесточением норм выброса CO_2 и экологическими проблемами со складированием, переработкой сталеплавильных шлаков, во всем мире проводятся работы по частичному или полному замещению в составе общестроительных бетонов типового портландцемента, крупных заполнителей – щебня, гравия и мелкого заполнителя – кварцевого пека. В работе [4] изучалось использование конвертерного шлака с размером частиц $5 + 20\text{ мм}$ как заменителя крупного заполнителя, а частиц с размером $0 + 5\text{ мм}$ как заменителя мелкого заполнителя в составе общестроительного бетона. Показано, что при замене природных заполнителей на конвертерный шлак марочная прочность бетона возрастает, что позволяет снизить расход цемента на 31 %. Аналогичные результаты приведены в работе [5]. Показано, что при частичной (на 30 %) замене природных заполнителей на шлаки ДСП физико-механические свойства бетонов возрастают, что позволило авторам сделать вывод, что использование шлаков ДСП для производства экологически чистого бетона допустимо. В работе [6] определены физико-механические свойства бетонов с частичной (30 %) заменой цемента золой уноса и частичной (50 %) заменой крупного заполнителя шлаком ДСП. Показано, что физико-механические свойства такого бетона выше, чем обычного бетона, изготовленного полностью на цементе и на природных заполнителях. В работе [7] изучалась замена крупного природного заполнителя на шлак ДСП при сохранении в качестве мелкого заполнителя природного кварцевого песка. Отмечено, что бетоны со шлаками ДСП набирают прочность в первые семь дней твердения быстрее, чем бетоны на природных заполнителях. Далее скорость набора прочности уменьшается, но в марочном возрасте прочностные свойства бетонов со шлаком выше, чем с

природными заполнителями. В работе [8] показано, что прочность и долговечность экобетона, полученного путем добавления алюминиевого шлака в количестве 5 % и шлака ДСП в количестве 20 % вместо природных заполнителей, сопоставимы с показателями обычного бетона. Общей характеристикой данных работ является то, что шлаки используются в основном как частичная или полная замена природных заполнителей, без замены общего принципа формирования прочности бетона за счет использования портландцемента. Такой подход не позволяет полностью исключить из состава бетона портландцемент, являющийся основным источником CO_2 , образующегося при его производстве.

Одним из путей полного отказа от портландцемента в составе бетонов и растворов является использование шлакощелочного вяжущего. Основы формирования такого вяжущего были заложены в работе Глуховского В.Д. [9]. Им предложено вводить в шлаки перед помолом различные щелочные добавки, которые при гидратации такого вяжущего образуют нерастворимые водные алюмосиликаты кальция и натрия – цеолиты. На основе такого вяжущего можно достигнуть прочности при сжатии 200 МПа. В настоящее время большинство работ по данной тематике посвящено щелочной активации доменных шлаков [10] и шлаков ДСП в смеси с другими отходами [11 – 13]. Основным недостатком такого вяжущего является необходимость очень тонкого помола шлаков и наличие в составе полностью затвердевшего бетона свободных щелочей, которые, мигрируя к поверхности бетона, вызывают образование сильнейших высолов на его поверхности. Данных недостатков лишены геополимерные вяжущие, в которых свободные щелочи, образующиеся при щелочной активации, связываются в трехмерную полимерную цепь [14]. Это достигается за счет введения в систему специально обработанных метакаолинов. Связанные в полимерную цепь щелочи не могут мигрировать к поверхности и образовывать на ней высолы.

Поскольку в шлаке ДСП присутствует значительное количество оксидов железа, а силикатная часть состоит из двухкальциевого силиката $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ и мервинита $3\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$, распадающегося при повышении основности на две молекулы двухкальциевого силиката и периклаза, авторы рассматривали возможность одновременного получения чугуна и портландцемента при повышении основности за счет введения высокоосновного шлака АКП и дополнительной извести. Лабораторные исследования и опытно-промышленные испытания показали возможность реализации такой технологии [15; 16]. При проведении данной работы установлено, что при смешении жидких шлаков ДСП, АКП и твердой извести в соотношении 64:17:17 % соответственно в продуктах плавки можно одновременно сформировать портландцементный клинкер и чугун при соотношении соот-

ответственно 82:18 %. Приготовленный на основе такого клинкера портландцемент имел следующие физико-механические свойства:

- начало схватывания – 175 мин;
- конец схватывания – 285 мин;
- равномерность изменения объема – 0,2 мм;
- прочность при сжатии через 2 сут – 11,7 МПа, через 28 сут – 47,8 МПа.

В соответствии с требованиями ГОСТ 31108 такой цемент имеет класс по прочности 42,5 Н. Химический состав полученного чугуна соответствовал требованиям ГОСТ 805 к передельному чугуну марки ПЛ 1, мас. %: 3,13 С; 2,26 Mn; 0,109 Si; 0,036 P; 0,021 S.

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ

Несмотря на положительные результаты испытаний, для реализации подобной технологии требуется полная реконструкция сталеплавильных цехов с созданием участка внепечной обработки шлака и полным изменением логистики технологических операций транспортировки и переработки шлаков.

В связи с этим было проработано другое направление придания сталеплавильным шлакам свойств минеральных вяжущих веществ – сульфатная активация шлаков. В строительной отрасли находят широкое применение некоторые специальные виды цементов, в частности гипсоглиноземистые цементы на основе сульфоалюминатов кальция [17] и сульфосиликатов кальция [18]. Гипсоглиноземистые цементы в строительстве широко используются для ремонта дорог и дорожных сооружений и находят достаточно обширное применение как системы быстрого бетонирования и гидроизоляции, в частности на основе таких цементов разработаны системы быстрого бетонирования Емасо¹. Также хорошо известно применение сульфоалюминатных и сульфоалюмоферритных вяжущих для изготовления расширяющихся тампонажных цементов [19].

В настоящее время известно несколько безводных минералов, обладающих достаточно высокими вяжущими свойствами, которые в своем составе содержат гипс. К ним относятся:

- сульфосиликат кальция – сульфоспуррит $2(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) \cdot \text{CaSO}_4$ [17;18];
- сульфоалюминат кальция – йелимит (yeelimit) $3(\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) \cdot \text{CaSO}_4$ [17];
- низкоосновной $3(\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3) \cdot \text{CaSO}_4$ и высокоосновной $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4$ сульфферриты кальция [20];
- группа сульфоалюмоферритов кальция с общей формулой $\text{CaO}_n \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3)_m \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3)_k \cdot (\text{SO}_3)_b$ [21].

Все эти минералы получают путем обжига сырьевых смесей при температурах 1100 – 1300 °С с последующим самостоятельным или совместным с портландцементом

помолом [17]. Применительно к сталеплавильным шлакам ДСП и АКП, содержащим в своем составе майенит C12A7 и двухкальциевые силикаты $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и $\gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, сульфатирование возможно за счет совместного помола шлаков с природным гипсом $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Первоначально сульфатная активация была применена авторами к шлакам АКП. Для предотвращения возникновения опасных напряжений при гидратации вяжущего, полученного совместным помолом шлака АКП и гипса, предложено при помоле вводить добавки, позволяющие формировать минеральное вяжущее вещество по принципу гипсоцементно-пуццолановых вяжущих [22]. В данном патенте шлак АКП и гипс выполняют роль основного вяжущего (цемента), а в качестве добавок, обладающих пуццолановыми свойствами, используются кислые шламы, шлаки и карбонаты кальция. В том числе используется шлак ДСП в количестве 9,5 – 23,0 %. Разработанное композиционное водостойкое гипсовое вяжущее позволило получить прочность при сжатии строительных изделий в диапазоне 5 – 10 МПа.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ

Дальнейшее изучение такой вяжущей системы показало, что увеличение в ней количества шлака ДСП позволяет существенно повысить прочность бетона, причем шлак ДСП можно вводить при приготовлении вяжущего в виде отсева фракции 0 + 5 мм. В связи с этим оптимизация прочностных свойств такого бетона осуществлялась методами планирования эксперимента с использованием симплекс-решетчатого метода и описанием результатов испытаний полиномом третьей степени. В качестве факторов варьирования принято содержание в сырьевой смеси шлака ДСП, шлака АКП и гипса дигидрата. Интервалы варьирования факторов приведены в табл. 1.

Область проведения оптимизации приведена на рис. 2.

В соответствии с планом проведения эксперимента готовились сырьевые смеси, которые затворялись водой при соотношении вода/твердое 0,4/1. Бетон заливался в стандартные формы и выдерживался в воздушно

Таблица 1. Интервалы варьирования факторов

Table 1. Intervals of the factors variation

Наименование фактора	Интервалы варьирования, мас. %	
	верхний	нижний
Содержание шлака ДСП	25	75
Содержание шлака АКП	25	75
Содержание гипса дигидрата	0	50

¹ Торговая марка Емасо. URL: <https://mpkm.org/masteremaco/?yclid=11188805335159930879> (дата обращения: 09.10.2024).

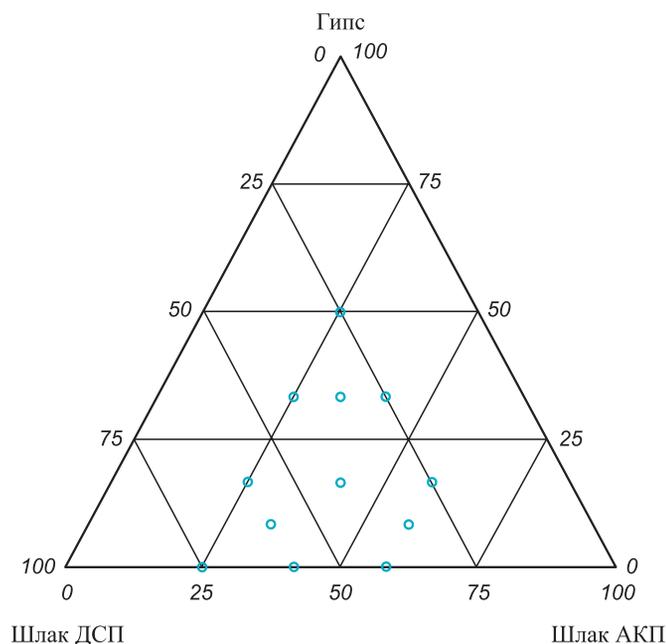


Рис. 2. Область проведения оптимизации

Fig. 2. Scope of optimisation

сухих условиях в течение 7 сут. Через 7 сут хранения у бетона определялась прочность при сжатии (функция отклика).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

План проведения эксперимента и результаты определения прочности бетона через 7 сут приведены в табл. 2.

Таблица 2. План проведения эксперимента и результаты испытаний

Table 2. Experimental plan and test results

Содержание в смеси, мас. %			$R_{7\text{ сж}}$, МПа
шлак ДСП	шлак АКП	гипс	
41,67	58,33	0	33,5
25,00	58,33	16,67	33,4
33,33	33,33	33,33	34,2
33,33	58,33	8,33	37,2
58,33	41,67	0	35,2
41,67	25,00	33,33	34,5
75,00	25,00	0	34,2
41,67	41,67	16,67	50,8
25,00	41,67	33,33	31,2
25,00	75,00	0	23,2
41,67	41,67	16,67	49,9
25,00	25,00	50,00	21,1
58,33	33,33	8,33	52,1
58,33	25,00	16,67	39,8

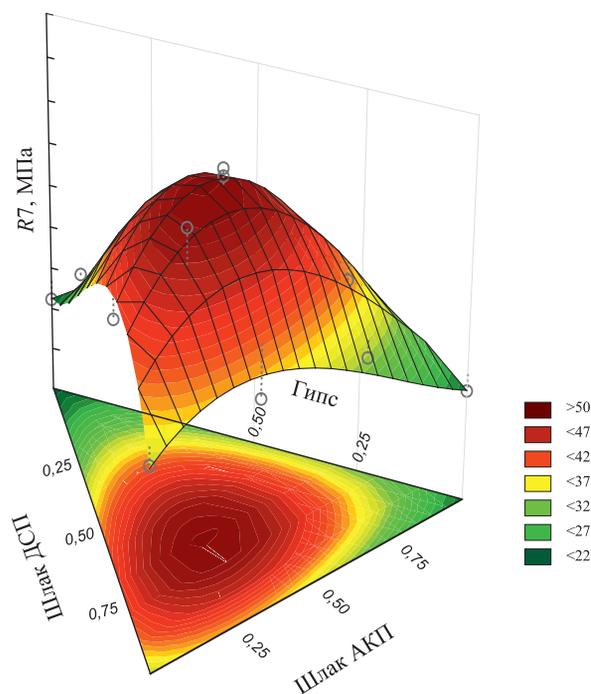


Рис. 3. Общий вид распределения функции отклика для предела прочности при сжатии вяжущего

Fig. 3. General view of response function distribution for compressive strength of the binder

На рис. 3 представлен общий вид распределения функции отклика для предела прочности при сжатии шлакового вяжущего.

На рис. 4 приведены изолинии равного предела прочности при сжатии шлакового вяжущего.

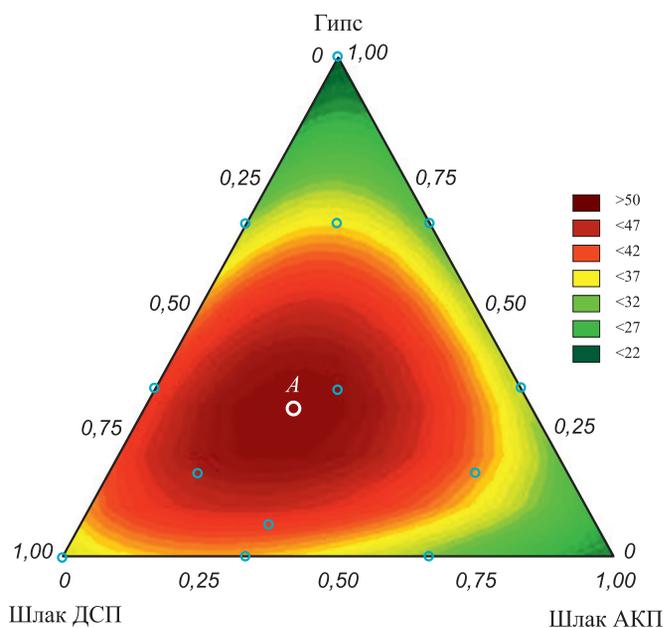


Рис. 4. Изолинии равного предела прочности при сжатии вяжущего

Fig. 4. Isolines of equal compressive strength when compressing the binder

Точка А на рис. 4 соответствует максимальной прочности вяжущего, равной 50,4 МПа при содержании шлака ДСП 42,0 %, шлака АКП 42 % и гипса дигидрата 16,0 %.

Результаты испытаний минеральных вяжущих веществ на основе сталеплавильных шлаков, образующихся в условиях современного сталеплавильного производства, позволяют сделать заключение о возможности их переработки способами, отличными от используемых в настоящее время. При переработке сталеплавильных шлаков предлагается не просто проводить их дробление и классификацию, а производить на их основе сухие строительные и бетонные смеси. Стоимость таких смесей на рынке гораздо выше стоимости классифицированных шлакового щебня и песка. Для их производства можно использовать готовые заводы по производству сухих строительных смесей, при этом потребуется минимальная реконструкция существующих копровых цехов металлургических предприятий.

Выводы

Образующиеся при выплавке стали шлаки содержат в своем составе активные гидравлические фазы, способные затвердевать при контакте с водой. В работе проанализированы современные способы переработки сталеплавильных шлаков и придания им свойств минеральных вяжущих веществ. Предложено перерабатывать сталеплавильные шлаки путем сульфатирования содержащихся в них гидравлически активных фаз. За счет сульфатирования минеральное вяжущее на основе сталеплавильных шлаков показывает высокие физико-механические свойства, сравнимые с минеральными вяжущими, приготовленными с применением портландцемента. Предложено производить на основе шлакового минерального вяжущего сухие строительные и бетонные смеси, пригодные для строительства дорог и общестроительного применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Смирнов Л.А., Сорокин Ю.В., Снятиновская Н.М., Данилов Н.И., Еремин А.Ю. Переработка техногенных отходов (по материалам программ по переработке техногенных образований Свердловской области). Екатеринбург: УИПЦ; 2012:607.
- Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Некрасов И.В., Егiazарьян Д.К., Метелкин А.А., Шевченко О.И. Вопросы утилизации рафинировочных шлаков сталеплавильного производства. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ; 2017:208.
- Леонтьев Л.И., Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Некрасов И.В., Егiazарьян Д.К. Технологические особенности переработки сталеплавильных шлаков в строительные материалы и изделия. *Строительные материалы*. 2014;(10):70–74.
Leont'ev L.I., Sheshukov O.Yu., Mikheenkova M.A., Nekrasov I.V., Egiazar'yan D.K. Technological features of processing steelmaking slags into building materials and products. *Stroitel'nye materialy*. 2014;(10):70–74. (In Russ.).
- Costa L.C.B., Nogueira M.A., Ferreira L.C., Elói F.P.F., Carvalho J.M.F., Peixoto R.A.F. Eco-efficient steel slag concretes: An alternative to achieve circular economy. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2022;(15):e15201. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000200001>
- Diotti A., Cominoli L., Galvin A.P., Sorlini S., Plizzari G. Sustainable recycling of electric arc furnace steel slag as aggregate in concrete: Effects on the environmental and technical performance. *Sustainability*. 2021;13(2):521. <https://doi.org/10.3390/su13020521>
- Sekaran A., Palaniswamy M., Balaraju S. A study on suitability of EAF oxidizing slag in concrete: An eco-friendly and sustainable replacement for natural coarse aggregate. *The Scientific World Journal*. 2015;(1):1–8. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/972567>
- Nguyen T.T.H., Phan D.H., Mai H.H., Nguyen D.L. Investigation on compressive characteristics of steel-slag concrete. *Materials*. 2020;13(8):1928. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13081928>
- Javali S., Chandrashekar A.R., Naganna S.R., Manu D.S., Hiremath P., Preethi H.G., Kumar N.V. Eco-concrete for sustainability: utilizing aluminium dross and iron slag as partial replacement materials. *Clean Technology and Environmental Policy*. 2017;19:2291–2304. <http://dx.doi.org/10.1007/s10098-017-1419-9>
- Глуховский В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные цементы и бетоны. Киев: Будівельник; 1978:184.
- Артамонова А.В., Воронин К.М. Шлакощелочные вяжущие на основе доменных гранулированных шлаков центробежно-ударного измельчения. *Цемент и его применение*. 2011;(4):108–113.
Artamonova A.V., Voronin K.M. Slag-alkaline binders based on blast-furnace granular slag of centrifugal impact grinding. *Tsement i ego primenenie*. 2011;(4):108–113. (In Russ.).
- Peys A., White C.E., Rahier H., Blanpain B., Pontikes Y. Alkali-activation of CaO-FeO_x-SiO₂ slag: Formation mechanism from in situ X-ray total scattering. *Cement and Concrete Research*. 2019;122:179–188. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.019>
- Peys A., White C.E., Rahier H., Blanpain B., Pontikes Y. Molecular structure of CaO-FeO_x-SiO₂ glassy slags and resultant inorganic polymers. *Journal of the American Ceramic Society*. 2018;101(12):5846–5857. <https://doi.org/10.1111/jace.15880>
- Sedira N., Castro-Gomes J. Effects of EAF-Slag on alkali-activation of tungsten mining waste: mechanical properties. *MATEC Web of Conferences*. 2019;274:01003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927401003>
- Дудников А.Г., Дудникова М.С., Реджани А. Геополимерный бетон и его применение. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2018;(2):38–45.
Dudnikov A.G., Dudnikova M.S., Redzhani A. Geopolymer concrete and its application. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2018;(2):38–45. (In Russ.).
- Михеенков М.А., Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Егiazарьян Д.К., Лобанов Д.А. Придание сталеплавильным шлакам свойств минеральных вяжущих веществ. *Сталь*. 2016;(3):66–69.

- Mikheenkov M.A., Sheshukov O.Yu., Nekrasov I.V., Egiazar'yan D.K., Lobanov D.A. Production of mineral binder from steel-smelting slag. *Steel in Translation*. 2016;46: 232–235. <https://doi.org/10.3103/S0967091216030098>
16. Пат. 2629424 RU. Способ переработки отходов сталеплавильного производства с получением портландцементного клинкера и чугуна / Михеенков М.А., Шешуков О.Ю., Некрасов И.В.; заявлено 21.04.2016; опубликовано 29.08.2017. Бюллетень № 25.
 17. Кузнецова Т.В. Алюминатные и сульфалоюминатные цементы. Москва: Стройиздат; 1986:208.
 18. Атакузиев Т.А. Сульфоминеральные цементы на основе фосфогипса. Ташкент: ФАН; 1979:152.
 19. Вяхирев В.И., Фролов А.А., Кривобородов Ю.Р. Расширяющиеся тампонажные цементы. Москва: ИРЦ РАО «Газпром»; 1998:52.
 20. Кузнецова Т.В., Сычев М.М., Осокин А.П. Специальные цементы. Санкт-Петербург: Стройиздат Спб; 1997:314.
 21. Самченко С.В. Сульфалоюмоферритные цементы. *Цемент*. 1986;(3):11–12.
Savchenko S.V. Sulfoaluminoferrite cements. *Tsement*. 1986;(3):11–12. (In Russ.).
 22. Пат. 2505504 RU. Композиционное водостойкое гипсовое вяжущее / Зуев М.В., Мамаев С.А., Михеенков М.А., Степанов А.И.; заявлено 13.7.2012; опубликовано 27.01.2014. Бюллетень № 3.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Олег Юрьевич Шешуков, главный научный сотрудник лаборатории порошковых, композиционных и наноматериалов, Институт металлургии Уральского отделения РАН; д.т.н., профессор, директор Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ORCID: 0000-0002-2452-826X

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Михаил Аркадьевич Михеенков, д.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии черных металлов, Институт металлургии УрО РАН; профессор, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ORCID: 0000-0002-7908-2955

E-mail: silast@mail.ru

Денис Константинович Егиазарьян, к.т.н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией проблем техногенных образований, Институт металлургии УрО РАН; доцент кафедры металлургии железа и сплавов, Уральский федеральный университет им. Первого Президента Б.Н. Ельцина

ORCID: 0000-0002-9833-7191

E-mail: avari@mail.ru

Александр Михайлович Михеенков, аспирант кафедры «Металлургия железа и сплавов», Уральский федеральный университет им. Первого Президента Б.Н. Ельцина

E-mail: ma@osk66.ru

Михаил Витальевич Клеоновский, инженер 1-й категории кафедры «Металлургия железа и сплавов», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ORCID: 0000-0002-8874-9061

E-mail: kleonovskiy@yandex.ru

Олег Владимирович Матюхин, к.т.н., доцент кафедры теплофизики и информатики в металлургии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

E-mail: o.v.matiukhin@urfu.ru

Oleg Yu. Sheshukov, Chief Researcher of the Laboratory of Powder, Composite and Nano-Materials, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0002-2452-826X

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Mikhail A. Mikheenkov, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory "Pyrometallurgy of Ferrous Metals", Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Prof., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0002-7908-2955

E-mail: silast@mail.ru

Denis K. Egiazar'yan, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Technogenic Formations Problems, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Assist. Prof. of the Chair of Metallurgy of Iron and Alloys, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0002-9833-7191

E-mail: avari@mail.ru

Aleksandr M. Mikheenkov, Postgraduate of the Chair "Metallurgy of Iron and Alloys", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

E-mail: ma@osk66.ru

Mikhail V. Kleonovskii, Engineer of the Chair "Metallurgy of Iron and Alloys", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0002-8874-9061

E-mail: kleonovskiy@yandex.ru

Oleg V. Matyukhin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

E-mail: o.v.matiukhin@urfu.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

О. Ю. Шешуков – исследование фазового состава сталеплавильных шлаков, разработка методики анализа фазообразования в условиях окислительного и восстановительного рафинирования, теоретический анализ химических и фазовых преобразований, разработка методов их оптимизации с целью улучшения гидравлической активности.

М. А. Михеенков – разработка модельных шлаков для исследований, изучение фазового состава шлаков АКП и ДСП, анализ их

O. Yu. Sheshukov – basic studies of the phase composition of steel-making slags, development of a methodology for analyzing phase formation under conditions of oxidative and reductive refining, theoretical analysis of chemical and phase transformations in slags, development of methods for their optimization in order to improve hydraulic activity.

M. A. Mikheenkov – development of model slags for research, study of the phase composition of LF and EAF slags, analysis of their hydrau-

гидравлической активности, руководство опытно-промышленными испытаниями по использованию шлаков в качестве вяжущих материалов.

Д. К. Егиазарьян – систематизация данных о способах переработки сталеплавильных шлаков, разработка методик помола шлаков и их использования в строительной промышленности, в том числе в производстве бетонов с использованием шлаков ДСП и АКП.

А. М. Михеенков – анализ взаимодействия шлаков с добавками, в том числе исследование возможности сульфатной активации сталеплавильных шлаков для использования в цементной промышленности; разработка рецептур и тестирование вяжущих материалов на основе шлаков.

М. В. Клеоновский – изучение физических и механических свойств бетонов на основе сталеплавильных шлаков, проведение тестов на прочность и долговечность бетонов с добавлением шлаков, анализ их экологической эффективности в строительстве.

О. В. Матюхин – обзор литературы по использованию шлаков в строительных материалах, анализ работ по щелочной активации шлаков и их применению в геополлимерных вяжущих.

lic activity; management of pilot industrial tests on the use of slags as binders.

D. K. Egiazar'yan – systematization of data on methods of processing steelmaking slags, development of methods for grinding slags and their use in the construction industry, including in the production of concrete using LF and EAF slags.

A. M. Mikheenkov – analysis of interaction of slags with additives, including exploring the possibilities of sulfate activation of steel slag for use in the cement industry; development of recipes and testing of slag-based binders.

M. V. Kleonovskii – study of the physical and mechanical properties of concretes based on steelmaking slags, conducting tests for the strength and durability of concretes with addition of slag, analysis of their environmental effectiveness in construction.

O. V. Matyukhin – theoretical review of literature on the use of slags in building materials, analysis of works on the alkaline activation of slags and their application in geopolymer binders.

Поступила в редакцию 04.09.2024
После доработки 27.09.2024
Принята к публикации 23.10.2024

Received 04.09.2024
Revised 27.09.2024
Accepted 23.10.2024
