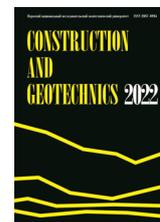




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 13, № 4, 2022

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.09

УДК 691.5: 667

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕКОРАТИВНОГО БЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖЕЛЕЗООКИСНОГО ШЛАКА

Л.Н. Ломакина¹, Д.А. Синицин¹, И.В. Недосеко¹, О.Н. Рахимова², Д.М. Рябых¹

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

²Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 23 сентября 2022

Одобрена: 11 ноября 2022

Принята к публикации:

15 ноября 2022

Ключевые слова:

декоративный бетон, железистый шлак, отходы металлургического производства, влияние фазового состава на свойства бетона, физико-химические исследования, структура бетона, микроструктура.

АННОТАЦИЯ

Проблема полезного применения многотоннажных отходов промышленности остро стоит во всем мире. Металлургическая промышленность не является исключением. Одним из актуальных направлений применения таких шлаков является строительная отрасль. Зачастую шлаки имеют множество примесей, отрицательно влияющих на качество материалов, из которых они могут быть изготовлены. Однако в небольшом количестве их удается применить в качестве пигментных красителей, позволяющих получить материалы необычного цвета. Декоративные бетоны отличаются от обычных «серых» бетонов тем, что придают архитектурную выразительность изделиям, в первую очередь для отделочных работ (стен, полов). Подбор состава такого бетона требует тщательного исследования как самих исходных материалов, в том числе шлаков, так и подбираемых составов на их основе.

В статье приведены исследования тонкомолотого шлака газоочистки металлургического производства, в том числе физико-химическими методами. Приведен анализ влияния многокомпонентного состава металлургического шлака на структуру и свойства будущего состава бетона. Выявлено, что практически все компоненты шлака не оказывают положительного влияния на гидравлическую или пуццоланическую активность вяжущего при формировании структуры цементного камня. Большая половина составляющих минералов шлака содержит железосодержащие соединения, придающие шлаку насыщенный коричневый цвет. Шлак обладает небольшим пластифицирующим

© Ломакина Лилия Наилевна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: lomakinaln@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4341-4986

Синицин Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: d4013438@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3780-2800

Недосеко Игорь Вадимович – доктор технических наук, профессор, e-mail: nedoseko1964@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6360-6112

Рахимова Ольга Николаевна – кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: RachimovaON@kfosu.edu.ru, ORCID: 0000-0001-6253-3126

Рябых Дмитрий Михайлович – аспирант, e-mail: 89273452615@yandex.ru

Liliya N. Lomakina – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: lomakinaln@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4341-4986

Dmitry A. Sinitsin – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: d4013438@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3780-2800

Igor V. Nedoseko – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: nedoseko1964@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6360-6112

Olga N. Rachimova – Ph. D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor, e-mail: RachimovaON@kfosu.edu.ru, ORCID: 0000-0001-6253-3126

Dmitrii M. Ryabykh – Postgraduate Student, e-mail: 89273452615@yandex.ru

эффектом. Частицы шлака способствуют высвобождению воды, удерживаемой частицами цемента, а значит, и увеличению общей удельной поверхности частиц цемента. Такая структура быстрее образует гидраты цементного геля, способствуя более ускоренной гидратации и набору прочности. Поэтому исследуемый шлак целесообразно использовать в качестве тонкомолотой пигментной добавки при подборе составов вяжущего и бетонов. Тонкомолотая структура шлака позволяет улучшить капиллярно-пористую структуру бетона, снизить расход цемента на 5–15 %, получив при этом бетон по прочности на сжатие класса не менее В30.

Подобраны составы декоративного вяжущего с использованием шлака и мелкозернистого декоративного бетона на его основе для декоративного покрытия полов. Наилучший состав бетона имеет прочность класса В40 для помещений с высокой интенсивностью воздействий.

© ПНИПУ

STUDY OF THE POSSIBILITY OF OBTAINING DECORATIVE CONCRETE USING IRON OXIDE SLAG

L.N. Lomakina¹, D.A. Sinitsin¹, I.V. Nedoseko¹, O.N. Rachimova², D.M. Ryabykh¹

¹Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation

²Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 23 September 2022

Approved: 11 November 2022

Accepted for publication:

15 November 2022

Keywords:

decorative concrete, iron oxide slag, metallurgical production waste, influence of phase composition on concrete properties, physical and chemical studies, concrete structure, microstructure.

ABSTRACT

The problem of the beneficial use of large-tonnage industrial waste is acute all over the world. The metallurgical industry is no exception. One of the actual areas of application of such slags is the construction industry. Often, slags have many impurities that adversely affect the quality of the materials from which they can be made. However, in a small amount they can be used as pigment dyes, which make it possible to obtain materials of an unusual color. Decorative concretes differ from ordinary "gray" concretes in that they give architectural expressiveness to products, primarily for finishing works (walls, floors). The selection of the composition of such concrete requires a thorough study of both the raw materials themselves, including slags, and the selected compositions based on them.

The article presents studies of finely ground slag from gas cleaning of metallurgical production, including physical and chemical methods. The analysis of the influence of the multicomponent composition of metallurgical slag on the structure and properties of the future composition of concrete is given. It was revealed that almost all components of the slag do not have a positive effect on the hydraulic or pozzolanic activity of the binder during the formation of the structure of the cement stone. More than half of the constituent minerals of the slag contains iron-containing compounds, giving the slag a rich brown color. The slag has a slight plasticizing effect. The slag particles contribute to the release of water retained by the cement particles, and, hence, to an increase in the total specific surface area of the cement particles. This structure hydrates the cement gel faster, resulting in faster hydration and strength development. Therefore, it is advisable to use the studied slag as a finely ground pigment additive in the selection of binder and concrete compositions. The finely ground structure of the slag makes it possible to improve the capillary-porous structure of concrete, reduce the consumption of cement by 5–15 %, while obtaining concrete in terms of compressive strength of a class of at least B30.

The compositions of the decorative binder were selected using slag and fine-grained decorative concrete based on it for decorative flooring. The best concrete composition has strength class B40 for rooms with high impact intensity.

© PNRPU

Введение

В настоящее время возросло количество многотоннажных отходов промышленности. Одним из наиболее эффективных способов использования этих отходов является их применение в качестве сырья при производстве строительных материалов. Наиболее распространенным направлением является применение отходов в качестве заполнителей или тон-

комолотых наполнителей в бетоны и растворы. Среди отходов промышленности интерес представляют шламы [1–3], зола уноса [4], а также шлаки – отходы металлургического производства. Такие шлаки богаты железом, от которого обычно шлак очищают. Однако все же в составе шлака остаются примеси в виде железосодержащих соединений.

Одним из направлений применения железистоокисных шлаков, образующихся из доменной печи или конвертера, является применение вяжущего, получаемого путем обжига в печи [5]. После магнитной сепарации шлак смешивают с известняком, измельчают и обжигают при температуре 1350 °С в течение часа. Далее клинкер охлаждают, измельчают, смешивают с 3 % гипса и производят помол до 3300 см²/г. Авторы утверждают, что бетон на таком вяжущем имеет прочностные характеристики выше стандартных значений, чем у бетона на обычном портландцементе типа I.

Применяют шлаки в качестве минеральных добавок в бетон. По своему содержанию шлаки могут обладать как гидравлической, так и пуццоланической активностью, а могут оставаться инертными. Авторами [6] исследована гидратация цементов с добавлением железосодержащего шлака до 70 масс. %. Была доказана пуццоланическая активность шлака, показавшего реакционную способность, аналогичную кремнистой золе-уносу. Гидратацию цементных композитов с применением шлака цветной металлургии исследовали также авторы работы [7]. Исследования показали встраивание Fe в гидратные гели Ca-Al-Si. Добавка шлака снизила усадку составов, не снижая при этом механическую прочность в течение 180 дней. Авторы [8] в своих составах использовали молотый гранулированный доменный шлак, заменяя им часть цемента в разных количествах: 50, 75 и 95 масс. %. Результаты исследований показали улучшение прочности составов на ранней и поздней стадиях гидратации, произошло значительное улучшение микроструктуры составов.

Однако большинство шлаков инертны. Более того, есть работы, которые доказывают, что стальные шлаки препятствуют ранней гидратации цемента, хотя механизм его такого действия до сих пор не достаточно изучен [9]. Авторы считают, что стальной шлак замедляет реакцию образования этtringита за счет снижения активации гипса, замедляет образование СН и CSH за счет снижения перенасыщения раствора по отношению к СН, а, значит, и образования зародышей и роста гидросиликатов. В таком случае при их введении в состоянии тонкого помола в небольших количествах дает возможность лишь улучшить капиллярно-пористую структуру бетона, а также применить в качестве пигментной составляющей при изготовлении бетонных изделий. Авторы исследований [10] предлагают вводить железистоокисный шлак в качестве пигмента в бетоны для изготовления различных изделий – брусчатки, черепицы, блоков. Отношение железистоокисного шлака к цементу должно быть в количестве не более 4 %. Автор работы [11] разработал составы цветного бетона с использованием различных видов железистоокисного шлака трех цветов: желтого, красного и черного. Желтый пигмент является инертным по отношению к цементу и его гидратным продуктам, содержит небольшое количество гетита, за счет чего красящая способность пигмента невысока и приобретает желтый цвет. Железистоокисный пигмент красного цвета имеет пониженную закристаллизованность и содержит примеси магнетита и лепидокрита. Черный пигмент состоит, в большей степени, из закристаллизованного магнетита с небольшим количеством маггемита. Исследовано влияние пигментов на структуру и свойства цементного камня. Красный и черный пигменты проявляют блокирующие свойства при кристаллизации портландита. Введение пигментов снижает водопотребность бетонных смесей, повышает высокообразование и снижает гидратацию цемента. Автор предлагает технологию получения пигментов путем их осаждения в результате синтеза на специально создаваемых зародышах

из микрокремнезема. Получение таких пигментов позволит решить вышеперечисленные проблемы, так как пигменты, образованные на микрокремнеземе, кроме своих красящих свойств, обладают пуццоланической активностью. Введение тонкомолотых шлаков позволяет снизить расход цемента по сравнению с бездобавочными бетонами порядка на 5–20 % в зависимости от состава шлака [12] с сохранением основных свойств бетона.

Исходные материалы

Одним из отходов газоочистки металлургического производства Ашинского металлургического завода является железистоокисный шлак, представляющий собой порошок насыщенного «шоколадного» цвета после помола (рис. 1). Было принято решение о проведении исследований его в качестве тонкомолотого наполнителя и шлака для бетона.



Рис. 1. Порошок из железистоокисного шлака
Fig. 1. Powder from iron oxide slag

В качестве области применения выбран бетон для устройства покрытия полов (бетонные покрытия). При проектировании бетонных покрытий необходимо учитывать интенсивность механических воздействий по СП 29.13330.2011. Для обеспечения наибольшей степени интенсивности (весьма значительной по СП 29.13330.2011) бетон покрытия пола должен иметь класс прочности на сжатие не менее В40. Для слабой степени механических воздействий достаточно получить бетон класса В15. Кроме того, к такому бетону применяется ряд других, не менее важных, требований, таких как истираемость, прочность на адгезию, реологические требования и т.д.

С целью подтверждения безопасного применения железистоокисного шлака было проведено определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов в его составе. Среднее значение пяти навесок составило 260 Бк/кг, что меньше допустимого значения 370 Бк/кг по ГОСТ 30108-94. Данный шлак соответствует материалам I класса и может быть использован во всех видах строительства. Насыпная плотность помолотого шлака составила 1061 кг/м³. Тонкость помола шлака по остатку на сите 0,05 составила 46 %, т.е. более половины шлака прошла через сито 0,05.

Фазовый состав железистоокисного шлака представляет собой сложную смесь веществ, представляющих интерес лишь с точки зрения применения его в качестве шлака при подборе состава декоративного бетона. Рентгенофазовый анализ шлака проводился на рентгеновском дифрактометре «D2 PHASER». Основной составляющей железистоокисного шлака по результатам рентгенофазового анализа его состава (рис. 2) является магнетит $Fe_{2,929}O_4$, который содержится в смеси в количестве около 44,42 %, именно его присутствие может дать насыщенный коричневый цвет всех тонов – в зависимости от его содержания по отношению

к остальным компонентам вяжущего. Кроме того, по данным авторов [13], присутствие магнетита $\text{Fe}_{2,929}\text{O}_4$ способствует значительному повышению плотности раствора. Обнаруженный в количестве 9,49 % эгирин $\text{NaFe} + 3(\text{SiO}_3)_2$ относится к группе метасиликатов [14]. Кроме того, в пробе обнаружены в достаточном количестве минералы, которые неблагоприятно могут воздействовать на структурообразование цементного камня. Так, геленит $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ (15,91 %) гидравлически не затвердевает, что приводит к неравномерному твердению цемента с частичным сбросом прочности во времени. Афтиталит $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$ (7,4 %) приводит к высокой концентрации сульфатов в растворе. Оксид кальция CaO (2,1 %) при взаимодействии с водой затвердения образует гидроксид кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, являющуюся активным компонентом при взаимодействии с кислыми (активным кремнезёмом SiO_2) в том числе и агрессивными, средами. Остальные минералы содержатся в малом количестве, несмотря на это, их присутствие благоприятно влияет на свойства декоративного бетона. Герцинит $(\text{Fe}_{0,867}\text{Al}_{0,133})(\text{Fe}_{0,235}\text{Al}_{1,765})\text{O}_4$ (5,69 %) придает вяжущему коричневый цвет. Окись железа Fe_2O_3 (5,44 %) оказывает благоприятное влияние на процесс минералообразования и на свойства цементного камня при количестве Fe_2O_3 до 15 % [15], а также окрашивает бетон в коричневый цвет. Необожжённый магнезит MgCO_3 (2,9 %), инертный и не способный реагировать с водой в обычных условиях гидратации [16], выполняет роль наполнителя. Двухокись кремния (кварц) SiO_2 (2,0 %) способствует развитию пуццолановой реакции цементного камня, повышая тем самым прочность и уплотняя его микроструктуру. Аллюминат кальция CaAl_2O_4 (1,48 %) обладает резко выраженными вяжущими свойствами, быстро твердеет в структуре цементного камня [14]. Шпинель $(\text{Mg}_{0,4}\text{Al}_{0,6})\text{Al}_{1,8}\text{O}_4$ (1,29 %) возможно применить в качестве тонкомолотого минерального наполнителя [17]. Такие минералы, как пирит FeS_2 (1,09 %), вызывают сульфатную коррозию цементного камня. Магнезиоферрит $\text{Mg}_{1,55}\text{Fe}_{1,6}\text{O}_4$ (0,8 %) с водой практически не реагирует, поэтому с точки зрения обладания вяжущими свойствами также не вызывает интерес.

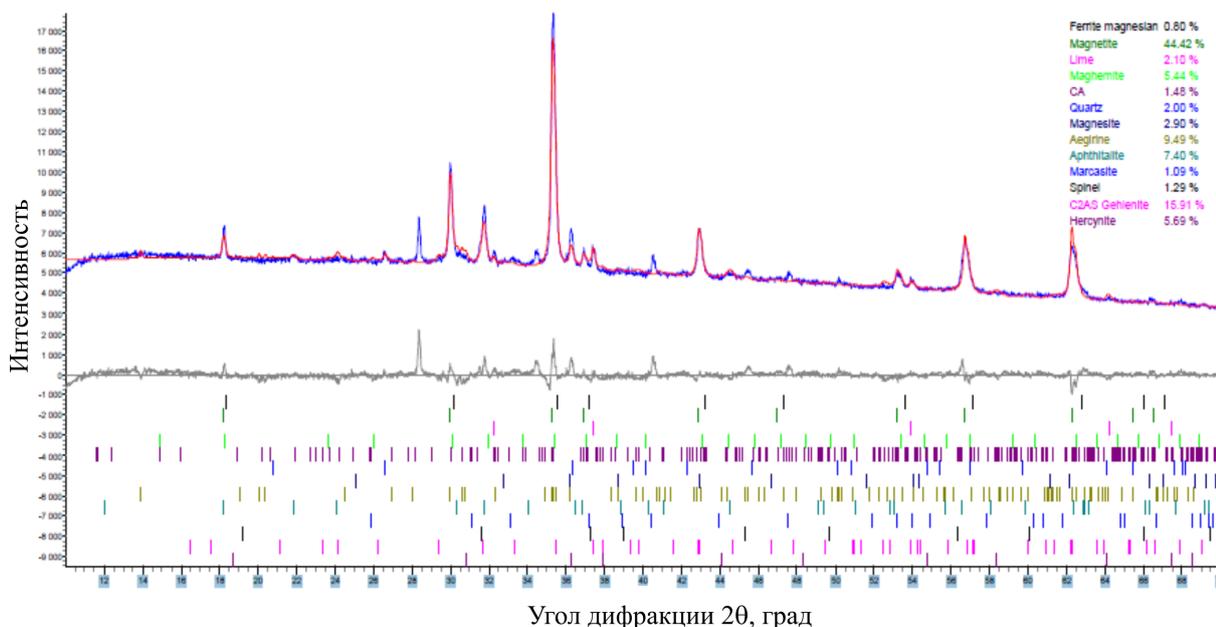


Рис. 2. Состав железистоокисного шлака по результатам рентгенофазового анализа
Fig. 2. The composition of iron oxide slag according to the results of X-ray phase analysis

Таким образом, фазовый состав железистого шлака представляет собой сложную смесь веществ, не участвующих в формировании прочной структуры цементного камня, но представляющих интерес с точки зрения применения его при подборе состава декоративного вяжущего в качестве пигмента и инертного тонкомолотого наполнителя. Кроме того, присутствуют вещества, отрицательно влияющие на структуру и свойства цементного камня, что необходимо было учесть при подборе состава декоративного бетона.

В качестве остальных исходных компонентов для подбора состава бетона приняты цемент класса ЦЕМ I 42,5Н производства ООО «ХайдельбергЦемент Рус», город Стерлитамак, песок Кабаковского месторождения Республики Башкортостан, щебень ОАО «Сангалыкский диоритовый карьер» Республики Башкортостан, пластифицирующая добавка MasterGlenium 115, стабилизирующая добавка MasterMartix100.

Подбор составов

Количество шлака в составах менялось, поэтому цвет составов также менялся в зависимости от содержания шлака. При соотношении цемента к пигменту 85 : 15 % состав получался более насыщенного, следовательно, при соотношении цемента к пигменту 95 : 5 % – менее насыщенного коричневого цвета. Все составы были испытаны на подвижность по ГОСТ 5802-86, которые имели различное водоцементное отношение и различное соотношение цемента к шлаку.

После проведения испытаний на подвижность смеси цемента и шлака обнаружено, что при добавлении шлака в небольшом количестве (до 5 %) подвижность возрастает по сравнению с контрольной смесью (без шлака), – видимо, за счет того, что в небольшом количестве частицы обладают пластифицирующим эффектом. При дальнейшем увеличении содержания шлака подвижность несколько уменьшается, но по-прежнему имеет большие значения, чем у контрольной смеси. Это означает, что частицы шлака способствуют высвобождению воды, удерживаемой частицами цемента, а значит, и увеличению общей удельной поверхности частиц цемента. Такая структура быстрее образует гидраты цементного геля, способствуя более ускоренной гидратации и набору прочности. Во всех составах со шлаком наблюдалось расслаивание смеси, которая возрастала с увеличением расхода шлака, поэтому в смесь решено было ввести стабилизатор. Оценивалась насыщенность цвета приготовленных составов (рис. 3).

Далее были подобраны составы бетона с применением шлака. Целью исследований было получить бетон класса прочности на сжатие не менее В40 для весьма значительной нагрузки пола по СП 29.13330.2011. Были проведены испытания составов на удобоукладываемость и время сохраняемости, среднюю плотность, прочность в возрасте 7 и 28 сут по ГОСТ 10181-2014, ГОСТ 7473-2010. Отобранный состав, достигший требуемой прочности В40, испытан на истираемость по СП 29.13330.2011.

Полученные результаты

Результаты рентгенофазового анализа показали, что металлургический шлак имеет многокомпонентный состав. Выявлено, что практически все компоненты шлака инертны в отношении гидравлической или пуццоланической активности для формирования структуры цементного камня. Большая половина составляющих минералов шлака содержит

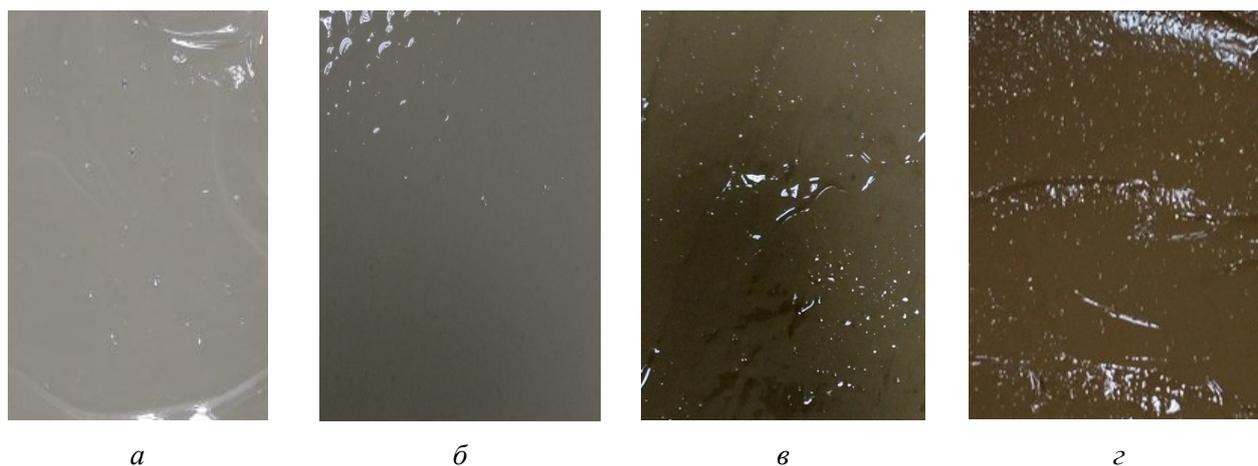


Рис. 3. Внешний вид составов вяжущего со шлаком: *a* – контрольный состав; соотношение «цемент / шлак»: *б* – 95 : 5; *в* – 90 : 10; *г* – 85 : 15
Fig. 3. Appearance of binder compositions with slag: *a* – control composition; cement / slag ratio: *б* – 95 : 5; *в* – 90 : 10; *г* – 85 : 15

железосодержащие соединения, придающие шлаку насыщенный коричневый цвет. Учитывая то, что шлак является тонкомолотым, произошло улучшение капиллярно-пористой структуры бетона, что оказало положительное влияние на прирост прочностных показателей бетона. Кроме того, шлак обладает небольшим пластифицирующим эффектом. Частицы шлака способствуют высвобождению воды, удерживаемой частицами цемента, а значит, и увеличению общей удельной поверхности частиц цемента. Такая структура быстрее образует гидраты цементного геля, способствуя более ускоренной гидратации и набору прочности. Поэтому исследуемый шлак целесообразно использовать в качестве тонкомолотой пигментной добавки при подборе составов вяжущего и бетонов.

Разработанные составы бетонных смесей по осадке конуса соответствовали маркам П4-П5 (19–22,7 см). По средней плотности бетон отнесен к особо тяжелым: она составила от 2519 до 2533 кг/м³, у контрольного – 2355 кг/м³. Время сохраняемости смеси составило от 1 ч 5 мин до 1 ч 17 мин (у контрольного состава – 42 мин). Средняя прочность образцов состава со шлаком в количестве 5 % в возрасте 7 сут составила 37,1 МПа, со шлаком в количестве 15 % – 30,7 МПа, что составило соответственно 72 и 60 % от требуемой прочности для В40, в возрасте 28 сут, соответственно 51,7 МПа (5 % шлака) и 40,5 МПа (15 % шлака), что составило соответственно 101 и 79 % от требуемой прочности. Однако состав, имеющий 15 % шлака, имеет также достаточную прочность, соответствующую классу бетона В30. Состав, достигший требуемой прочности В40, испытан на истираемость, которая составила 0,1 г/см², что не превышает требуемого значения 0,2 г/см².

Выводы

По результатам рентгенофазового анализа шлака основным компонентом является магнетит $\text{Fe}_{2,929}\text{O}_4$ в количестве около 44,42 %, не обладающий гидравлической или пуццоланической активностью, но придающий составам благородный коричневый цвет. Обнаружены и другие железосодержащие фазы в небольших количествах – $\text{NaFe} + 3(\text{SiO}_3)_2$, герцинит $(\text{Fe}_{0,867}\text{Al}_{0,133})(\text{Fe}_{0,235}\text{Al}_{1,765})\text{O}_4$, окись железа Fe_2O_3 , пирит FeS_2 , магнезиоферрит

$Mg_{1,55}Fe_{1,6}O_4$ в общем количестве 22,51 %. Оставшиеся фазы – это достаточно инертные геленит, магнезит и шпинель, а также небольшое количество фаз, проявляющих совместную активность, – свободной извести и кварца, гидравлически активного алюмината кальция. Присутствие афтиталита $K_3Na(SO_4)_2$ повышает количество сульфатов в растворе, связывая алюминатные составляющие шлака и цемента.

Подобран состав декоративного бетона, соответствующий заданному классу бетона. Подобренный состав имеет прочность класса В40, на его основе покрытие пола можно отнести к беспыльным покрытиям с истираемостью не более $0,2 \text{ г/см}^2$, что подходит для помещений с высокой интенсивностью воздействий.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Оценка возможности применения в строительстве бурового шлама Республики Башкортостан / Г.Ю. Шагигалин [и др.] // Строительные материалы. – 2016. – № 11. – С. 57–58.
2. Возможность применения буровых отходов в производстве строительных материалов / Л.Н. Ломакина [и др.] // 66-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Уфимского государственного нефтяного технического университета: сб. материалов конф. – Уфа, 2015. – С. 281–282.
3. Дорожно-строительный композиционный материал на основе бурового шлама: пат. 2629634 С Рос. Федерация / Л.Н. Ломакина [и др.]. – № 2016132021; заявл. 03.08.2016; опубл. 30.08.2017.
4. Мащенко А.В., Пономарев А.Б., Спирова Т.А. Применение золы уноса в качестве оснований фундаментов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 89–96. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.10
5. Ahmad Monshi, Masoud Kasiri Asgarani. Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone // Cement and Concrete Research. –1999. – Vol. 29, iss. 9. – P. 1373–1377. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00028-9
6. Hydration of blended cement with high volume iron-rich slag from non-ferrous metallurgy / Vincent Hallet, Malene Thostrup Pedersen, Barbara Lothenbach, Frank Winnefeld, Nele De Belie, Yiannis Pontikes // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 151. – P. 106624. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106624
7. Iron-rich slag addition in ternary binders of Portland cement, aluminate cement and calcium sulfate / Jennifer Astoveza, Romain Trauchessec, Sylvie Migot-Choux, Ratana Soth, Yiannis Pontikes // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 153. – P. 106689. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106689
8. Xuerun Li, Julien Bizzozero, Christoph Hesse. Impact of C-S-H seeding on hydration and strength of slag blended cement // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 161. – P. 106935. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106935
9. Shiyu Zhuang, Qiang Wang. Inhibition mechanisms of steel slag on the early-age hydration of cement [Электронный ресурс] // Cement and Concrete Research. – 2021. –

Vol. 140. – P. 106283. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106283. – URL: <https://www.science-direct.com/science/article/pii/S0008884620315635>

10. Hyun-Soo Lee, Jae-Yong Lee, Myoung-Youl Yu. Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Vol. 33, iss. 11. – P. 1889–1896. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00209-6

11. Лейдерман Л.П. Свойства декоративных бетонов с использованием железистых пигментов Челябинского завода ЖБИ-1: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2003. – 23 с.

12. Ахвердиева Т.А., Джафаров Р. Влияние тонкомолотых минеральных добавок на свойства бетона // *Строительные материалы*. – 2019. – № 3. – С. 73–76. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-73-76

13. Данюшевский В.С., Алиев Р.М., Толстых И.Ф. Справочное руководство по тампонажным материалам. – М.: Недра, 1987. – 373 с.

14. Бобкова Н.М. Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов. – Минск: Высшая школа, 2007. – 301 с.

15. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1980. – 472 с.

16. Петрова Л.В. Химия вяжущих строительных материалов. – Ульяновск: Изд-во Ульяновск. гос. техн. ун-та, 2009. – 64 с.

17. Исследование влияния комплексных минеральных модифицирующих добавок, включая нанодобавки, на свойства мелкодисперсного бетона / Буренина О.Н. [и др.] // *Актуальные вопросы технических наук: сб. ст. III Междунар. науч. конф.* – Пермь: Зебра, 2015. – С. 101–104.

References

1. Shagigalin G.Yu. [et al.]. Assessment of the use of drilling cuttings of the Republic of Bashkortostan in construction. *Construction materials*, 2016, no. 11, pp. 57-58.

2. Lomakina L.N. [et al.]. The possibility of using drilling waste in the production of building materials. *66th scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists of USPTU: collection of conference materials*. Ufa, Ufa State Oil Technical University, 2015, pp. 281-282.

3. Lomakina L.N. [et al.]. Road construction composite material based on drill cuttings. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2629634 C (2017).

4. A.V. Mashchenko A.V., A.B. Ponomarev A.B., T.A. Spirova T.A. The use of fly ash as foundation bases. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2017, vol. 8, iss. 3, pp. 89–96. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.10.

5. Ahmad Monshi, Masoud Kasiri Asgarani. Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone. *Cement and Concrete Research*, 1999, vol. 29, iss. 9, pp. 1373-1377. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00028-9.

6. Vincent Hallet, Malene Thostrup Pedersen, Barbara Lothenbach, Frank Winnefeld, Nele De Belie, Yiannis Pontikes. Hydration of blended cement with high volume iron-rich slag from non-ferrous metallurgy. *Cement and Concrete Research*, 2022, vol. 151, pp. 106624. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106624.

7. Jennifer Astoveza, Romain Trauchessec, Sylvie Migot-Choux, Ratana Soth, Yiannis Pontikes. Iron-rich slag addition in ternary binders of Portland cement, aluminate cement and calcium sulfate. *Cement and Concrete Research*, 2022, vol. 153, pp. 106689. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106689.
8. Xuerun Li, Julien Bizzozero, Christoph Hesse. Impact of C-S-H seeding on hydration and strength of slag blended cement. *Cement and Concrete Research*, 2022, vol. 161, pp. 106935. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106935.
9. Shiyu Zhuang, Qiang Wang. Inhibition mechanisms of steel slag on the early-age hydration of cement. *Cement and Concrete Research*, 2021, vol. 140, pp. 106283. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106283.
10. Hyun-Soo Lee, Jae-Yong Lee, Myoung-Youl Yu. Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks. *Cement and Concrete Research*, 2003, vol. 33, iss. 11, pp. 1889-1896. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00209-6.
11. Leiderman L.P. Properties of decorative concretes using iron oxide pigments of the Chelyabinsk plant ZHBI-1. Abstract of Ph. D. thesis. Chelyabinsk, 2003, 23 p.
12. Akhverdieva T.A., Jafarov R. Influence of finely ground mineral additives on the properties of concrete. *Building materials*, 2019, no. 3, pp. 73–76. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-73-76.
13. Danyushevsky V.S., Aliev R.M., Tolstykh I.F. Reference guide to backfill materials. Moscow, Nedra, 1987, 373 p.
14. Bobkova N.M. Physical chemistry of refractory non-metallic and silicate materials. Minsk, Higher school, 2007, 301 p.
15. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Chemical technology of binders. Moscow, Higher school, 1980, 472 p.
16. Petrova L.V. Chemistry of binding building materials. Ulyanovsk, UIGTU, 2009, 64 p.
17. Burenina ON [et al.]. Study of the influence of complex mineral modifying additives, including nanoadditives, on the properties of fine concrete. *Topical issues of technical sciences: collection of articles of the III International Scientific Conference*. Perm, Zebra, 2015, pp. 101-104.