

А.И. ФАДИН✉, И.О. РОМАНЕНКО

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
ул. Германа Титова, д. 28, г. Пенза, 440028, Российская Федерация

НАУЧНО–ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ОРГАНИЗАЦИОННО– ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ

Аннотация

Введение. В данной статье представлены результаты исследовательских работ по дальнейшему развитию технологии ускоренной карбонизации сталеплавильных шлаков в направлении изготовления натуральных образцов строительных изделий (строительного кирпича, тротуарной плитки).

Цель. Получение изделий, по физико-механическим характеристикам не уступающим дорожно-строительным мелкоштучным изделиям (плитка, кирпич), без применения связующих и других видов активации шлаков (помол, введение щелочей и т. д.), имея систему из трех компонентов: сталеплавильный шлак, вода и углекислый газ (CO_2).

Материалы и методы. В работе использовался сталеплавильный шлак ПАО «НЛМК» фракции до 10 мм, газообразная углекислота по ГОСТ 8050-85 в баллоне. Проведены исследования влияния следующих технологических факторов, влияющих на физико-механические характеристики получаемых изделий:

1. В процессе формования изделий: гранулометрический состав смеси; влажность формовочной смеси; плотность свежееотформованных изделий; предварительная выдержка и сушка для снижения влажности перед карбонизацией.

2. В процессе ускоренной карбонизации: давление, температура, концентрация CO_2 , время карбонизации.

Результаты. Экспериментально доказана возможность получения гиперпрессованием мелкоштучных дорожно-строительных изделий на основе сталеплавильных шлаков методом ускоренной карбонизации с прочностными характеристиками, не уступающими требованиям к мелкоштучным дорожным бетонам.

Выводы. Доказана возможность изготовления высококачественных мелкоштучных изделий без применения связующих и других видов активации шлаков (помол, введение щелочей и т. д.). Установлены технологические закономерности получения изделий со следующими характеристиками: предел прочности при сжатии – 15–85 МПа, средняя плотность – 1700–2450 кг/м³, морозостойкость – до F₂₀₀.

Ключевые слова: сталеплавильный шлак, ускоренная карбонизация, мелкоштучные строительные изделия, камера избыточного давления для карбонизации, автоклав

Для цитирования: Фадин А.И., Романенко И.О. Научно-технологические и организационно-технические аспекты производства строительных материалов на основе сталеплавильных шлаков // *Бетон и железобетон*. 2024. № 2 (621). С. 33–41. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-2\(621\)-33-41](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-2(621)-33-41)

Вклад авторов

Авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 10.04.2024

Поступила после рецензирования 29.05.2024

Принята к публикации 04.06.2024

A.I. FADIN✉, I.O. ROMANENKO

Penza State University of Architecture and Construction,
German Titov str., 28, Penza, 440028, Russian Federation

SCIENTIFIC, TECHNOLOGICAL, ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL ASPECTS OF THE PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS BASED ON STEELMAKING SLAGS

Abstract

Introduction. This article presents research work on the further development of the technology of accelerated carbonation of steelmaking slags in the direction of manufacturing full-scale samples of building products (building bricks, paving slabs).

Aim. Obtain products with physics-mechanical characteristics that are not conceding to small-piece road construction products (tiles, bricks) without the use of binders and other types of slag activation (grinding, introduction of alkalis, etc.), having a system of three components: steel-making slag, water and carbon dioxide (CO₂).

Materials and methods. Steelmaking slag of PJSC NLMK with fractions up to 10 mm and gaseous carbon dioxide in a gas bottle in accordance with State Standard 8050-85 were used in the work. The influence of the following technological factors affecting the physical and mechanical characteristics of the obtained products has been studied: 1. In the process of molding products: granulometric composition of the mixture; humidity of the molding mixture; density of freshly molded products; pre-exposure and drying for reducing of humidity before carbonation. 2. In the process of accelerated carbonation: pressure, temperature, CO₂ concentration, carbonation time.

Results. The possibility of obtaining of small-piece road construction products based on steelmaking slags by hyperpressing using accelerated carbonation with strength characteristics that are not conceding to the requirements for small-piece road concretes has been experimentally proved.

Conclusions. The possibility of manufacturing of high-quality small-piece products without the use of binders and other types of slag activation (grinding, introduction of alkalis, etc.) has been proved. Technological patterns for obtaining products with the following characteristics have been established: compressive strength – 15–85 MPa, average density – 1700–2450 kg/m³, frost resistance – up to F₂₀₀.

Keywords: steelmaking slag, accelerated carbonation, small-piece construction products, overpressure chamber for carbonation, autoclave

For citation: Fadin A.I., Romanenko I.O. Scientific, technological, organizational and technical aspects of the production of building materials based on steelmaking slags. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2024, no. 2 (621), pp. 33–41. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-2\(621\)-33-41](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-2(621)-33-41)

Authors contribution statement

All authors made equal contribution to the study and the publication.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 10.04.2024

Revised 29.05.2024

Accepted 04.06.2024

Ежегодное образование шлаков черной металлургии в РФ составляет: доменных ~53 млн т, сталеплавильных ~25 млн т.

Доменные шлаки практически полностью используются в стройиндустрии и дорожном строительстве. Доменные шлаки являются компонентом при производстве портландцемента и шлакопортландцемента, применяются в качестве заполнителей при производстве бетона, а также в качестве материала при устройстве дорожных одежд.

С переработкой и вторичным использованием сталеплавильных шлаков (СШ) ситуация осложнена их склонностью к самораспаду. При хранении СШ на открытых полигонах их попеременное увлажнение и высушивание под воздействием атмосферы способствуют гидратации активных оксидов кальция и магния. В результате длительного хранения (продолжительность периода вылеживания измеряется годами) протекают процессы самораспада шлака, в результате чего образуется относительно устойчивый материал.

Дальнейший процесс переработки основных объемов СШ представляет собой дробление, извлечение магнитных фракций, рассев на фракции. СШ фракцией более 10 мм находят свое применение в дорожном строительстве, а фракцией менее 10 мм продолжают накапливаться из года в год, ухудшая экологию и занимая все новые территории шлаковыми отвалами. Так, в Китае [1, 2] около 10 % получаемых СШ используются в дорожном строительстве. Данный материал применяется в качестве материала для расклинцовки щебеночной подушки под дорожную одежду. Такое отношение к СШ обусловлено процессами, характеризующимися известковым и магнезиальными распадами частиц СШ. Известковый распад протекает в результате реакций взаимодействия CaO с водой и последующей карбонизацией в результате взаимодействия с углекислым газом, содержащимся в воздухе [3, 4].

Главными сдерживающими факторами для использования СШ в производстве строительных материалов являются:

- непостоянство химического и минералогического составов;
- неустойчивая структура (подверженность силикатному, известковому и железистому распаду);
- необходимость помола сталеплавильного шлака до удельной поверхности $S_{\text{уд}} = 3500\text{--}4000 \text{ см}^2/\text{г}$ для активации шлака и обеспечения его использования в качестве вяжущего.

В то же время некоторые исследователи [5–7] в своих работах предлагают использовать сталеплавильный шлак в качестве частичной замены мелкого и крупного заполнителей в тяжелых бетонах в том случае, если суммарное количество ($\text{CaO} + \text{MgO}$) не превышает 40 %, а количество MgO не превышает 5–8 %. Таким образом, на основании предварительного анализа химического состава сталеплавильного

шлака делается вывод о его пригодности для использования в качестве заполнителей. Однако не приводится анализа возможности применения полученных заполнителей в зависимости от их устойчивости различным видам распадов, а также содержания активных $\text{CaO} + \text{MgO}$.

Также в научных работах [8–10] изложено использование СШ при производстве композиционных вяжущих, бетонов и закладочных смесей.

Следует отметить, что для регулирования физико-механических свойств СШ необходима их предварительная подготовка:

- механическая (дробление, помол, извлечение остатков магнитных фракций, виброактивация);
- химическая (введение добавок);
- тепловая (расплав сталеплавильного шлака с введением в него других видов шлака и быстрое охлаждение, автоклавная обработка, температурно-влажностная обработка, резкое охлаждение);
- ультразвуковая (увеличение скорости химической реакции).

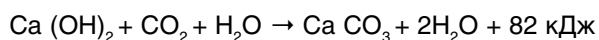
Все эти процессы связаны с большими затратами на подготовительные циклы и непосредственно на производство бесцементного вяжущего, что экономически нецелесообразно.

Для поиска более экономной переработки СШ многие ученые стали обращать внимание на естественный процесс карбонизации.

Об обработке кальцийсодержащих материалов углекислотой в производстве строительных изделий (карбонизация) известно давно. Карбонизация извести углекислым газом, содержащимся в воздухе, считалась вторичным процессом твердения известковых (содержащих кальций и магний) растворов. Однако этот процесс длился десятилетиями вследствие малой скорости карбонизации. Исследования по интенсификации процессов карбонизации достаточно широко проводились в XX веке учеными разных стран, в том числе и в СССР [11, 12].

Ускоренная карбонизация – процесс эффективного воздействия углекислотой на свежееотформованные или набравшие прочность изделия, содержащие в своем составе оксиды кальция и магния, а также другие минералы, при котором ускоренно образуются прочные и нерастворимые карбонаты [13].

Гидроксид кальция выступает основным веществом в составе сталеплавильных шлаков, обеспечивающим высокие прочностные характеристики при ускоренной карбонизации. Твердение происходит в результате реакции карбонизации, когда CO_2 в воздухе распространяется через открытые поры в образце и растворяется в воде, находящейся внутри капиллярных пор, а также реагирует с растворенным гидроксидом кальция. Это приводит к осаждению кристаллов карбоната кальция, выделению воды и тепла. Этот экзотермический процесс можно представить следующим образом [14]:



Процесс карбонизации протекает от поверхности во внутрь образца. Поэтому сложность при изготовлении изделий связана с задачей обеспечения максимально равномерной карбонизации всего внутреннего объема образцов.

В большинстве работ изучается процесс карбонизации на образцах-цилиндрах диаметром 15–30 мм [15–17], что не может давать объективного представления о равномерности, скорости и глубине карбонизации мелкоштучных строительных изделий (кирпича, тротуарной плитки), имеющих значительно большие геометрические параметры (до 250 мм).

Авторами настоящей работы ранее на образцах-цилиндрах (60 мм) были проведены масштабные исследования по определению зависимости степени карбонизации от таких факторов, как влажность формовочной смеси, давление углекислого газа в автоклаве в процессе карбонизации, продолжительность процесса карбонизации, температура процесса и др. [18, 19]. В результате проведенных работ были определены требуемые технологические режимы, при которых достигается равномерная карбонизация всего объема образцов-цилиндров. При этом получены следующие показатели готовых образцов: класс прочности на сжатие В30, морозостойкость F₂₀₀.

Для промышленного производства необходимо исследование натуральных образцов строительных материалов и отработка технологии их изготовления. Самым важным технологическим фактором является равномерность карбонизации на всю глубину. При этом гарантированно обеспечиваются эксплуатационные характеристики строительных изделий.

В лабораторных условиях были изготовлены натурные образцы строительных материалов (строительного кирпича и тротуарных плит).

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью разработки технологий рециклинга, в данном случае – технологии получения из мелкофракционных сталеплавильных шлаков (без введения других компонентов) искусственного камня со свойствами, аналогичными мелкозернистому бетону на портландцементном вяжущем. Структурообразование (или активизация) сталеплавильных шлаков осуществляется способом ускоренной карбонизации – принудительного воздействия углекислотой на изготовленные при определенных технологических параметрах изделия из сталеплавильного шлака.

Материалы

Был использован сталеплавильный шлак фр. 0,0–5,0 мм ПАО «НЛМК».

В табл. 1 представлены характеристики отсева сталеплавильного шлака. Модуль крупности M_{кр} 2,2. Содержание зерен свыше 5 мм – 14 %. В табл. 2 представлен химический состав сталеплавильного шлака.

Для проведения экспериментов по карбонизации использовалась газообразная углекислота по ГОСТ 8050-85 [20] в баллоне и углекислота твердая по ГОСТ 12162-77 [21].

Методика проведения работ

Для проведения экспериментальных работ по ускоренной карбонизации образцов кирпичей и тротуарных плит использована установка избыточного давления CO₂, разработанная авторами [22].

Приготовление смеси сталеплавильного шлака и воды производилось в лабораторном смесителе со скоростью перемешивания лопастей 25 об/мин.

Вязущих веществ или иных химических (или) активирующих процесс твердения добавок не применялось.

Изготовление образцов производилось на лабораторном прессе в соответствующих пресс-формах:

– кирпича строительного размером 250 × 120 × 88 мм (партия 1);

Таблица 1
Table 1

Рассев сталеплавильного шлака
Steelmaking slag sowl

Наименование показателей	Фактические показатели					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	< 0,16
Частный остаток на сите, %	11,7	15,2	16,6	16,3	20,6	19,6
Полный остаток на сите, %	11,7	26,9	43,5	59,8	80,4	–

Таблица 2
Table 2

Химический состав сталеплавильного шлака
Chemical composition of steelmaking slag

MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	S	CaO	MnO	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	R ₂ O	Zn	C
7,58	3,48	13,79	0,3	49,88	1,98	9,75	10,2	0,25	0,17	0,011	1,15

– плит тротуарных размером 100 × 200 × 60 мм (партия 2).

Давление, развиваемое установкой при формовании:

- кирпичей (партия 1) – 20 МПа;
- плит тротуарных (партия 2) – 30 МПа.

Влажность формовочной смеси составляет 6–8 %.

Внешний вид образцов до карбонизации показан на рис. 1. Твердение образцов производилось в камере избыточного давления для карбонизации (автоклаве) в среде газообразного CO_2 по следующей схеме:

- создание вакуума до 0,06 МПа – 15 мин;
- подача CO_2 со скоростью 0,1 МПа/мин до заданного значения 1,2 МПа;

– сброс давления со скоростью 0,1 МПа/мин;

– выдержка 18 часов.

После карбонизации из кирпичей и тротуарных плит выбуривались образцы-цилиндры, которые в дальнейшем подвергались испытаниям.

Из образцов кирпича и плитки были выбурены образцы-цилиндры (рис. 2), на которых производилось определение физико-механических характеристик:

- поверхностная прочность определялась неразрушающим методом (рис. 3) с использованием ИПС-МГ 4.04;
- предел прочности при сжатии определялся на испытательном прессе (ГОСТ 10180-2012 [23]);
- морозостойкость проводили по III ускоренному методу (ГОСТ 10060-2012 [24]) при $t_{\text{замор.}} = (-50 \pm 2)^\circ\text{C}$, $t_{\text{оттаив.}} = (+18 \pm 2)^\circ\text{C}$ в 5%-ном растворе NaCl (рис. 4, 5).

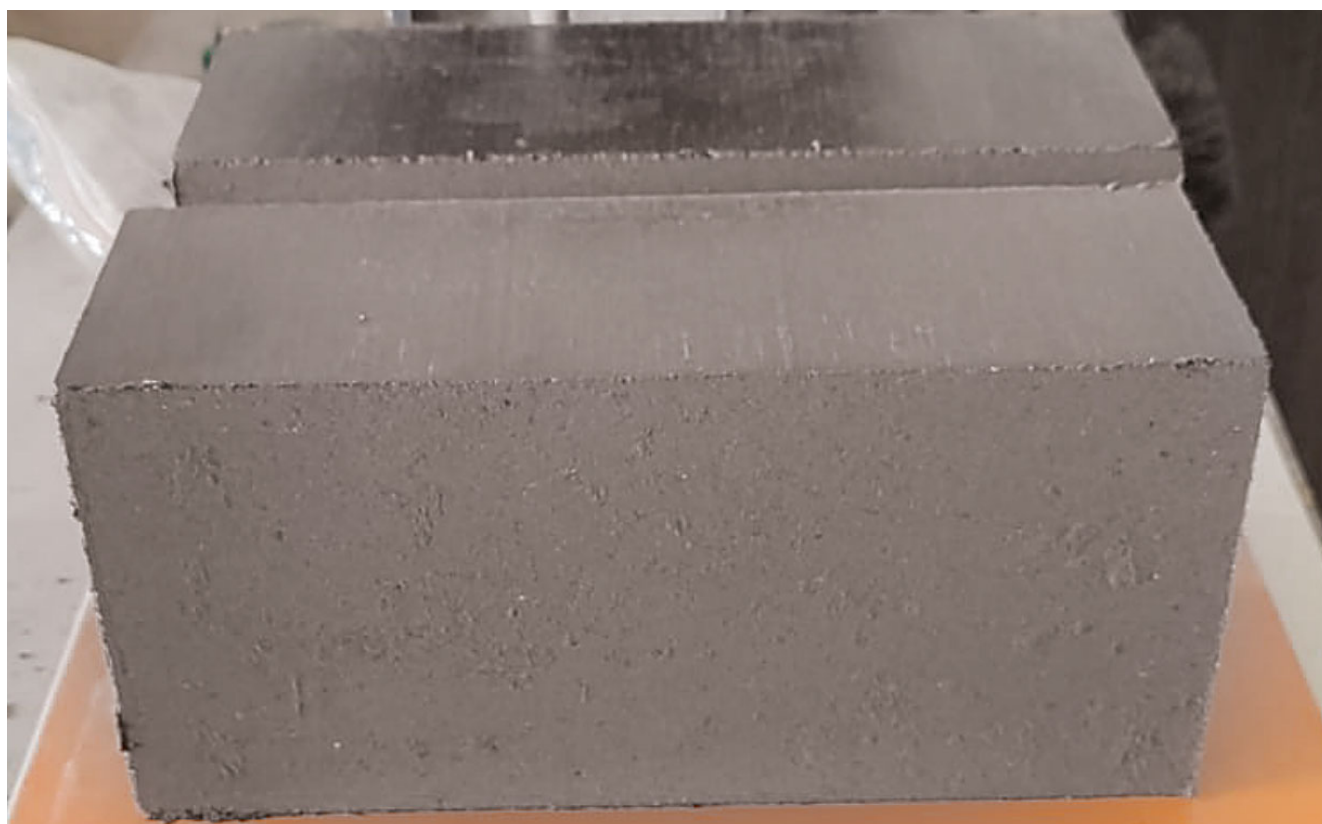


Рис. 1. Внешний вид образцов кирпичей и плит до карбонизации

Fig. 1. The appearance of samples of bricks and slabs before carbonation



Рис. 2. Установка для выбуривания кернов
Fig. 2. Cores drilling setup



а (а) **б (б)** **в (в)**
Рис. 3. Поверхностная прочность лицевой (а), боковой (б) и нижней (в) поверхностей плитки тротуарной
Fig. 3. Surface strength of front (a), side (b) and bottom (c) surfaces of paving tiles



Рис. 4. Внешний вид образцов-цилиндров партии № 1 после испытания на морозостойкость (20 циклов). Внешних дефектов и повреждений образцов не наблюдается
Fig. 4. The appearance of the cylinder samples of batch No. 1 after the frost resistance test (20 cycles). There are no external defects or damage of the samples found



Рис. 5. Внешний вид образцов-цилиндров партии № 2 после испытания на морозостойкость (20 циклов). Внешних дефектов и повреждений образцов не наблюдается
Fig. 5. The appearance of the cylinder samples of batch No. 2 after the frost resistance test (20 cycles). There are no external defects or damage to the samples found

По результатам исследования физико-механических свойств установлено следующее:

1. Значения средней плотности кирпичей партии № 1 и плитки партии № 2 различаются значительно и составляют: рп. № 1 = 2126 кг/м³, рп. № 2 = 2340 кг/м³.

2. Водопоглощение для партии № 1 составляет $W = 13,03 \%$; для партии № 2 – $W = 9,87 \%$.

3. Истинная плотность бетона для партии № 1 составила 2,992 г/см³; для партии № 2 – 3,008 г/см³.

4. Полная пористость бетона для партии № 1 выше, чем для партии № 2: $V(N_1) = 28,94 \%$; $V(N_2) = 22,20 \%$.

5. Предел прочности при сжатии партии № 1 (с учетом отношения h/d) составил № 1 = 23,2 МПа, для партии № 2 – 42,5 МПа.

6. В водонасыщенном состоянии наблюдается снижение прочности при сжатии: $\Delta R = -36,4 \%$ для партии № 1 и $\Delta R = -11,3 \%$ для партии № 2.

7. Морозостойкость проводили по III ускоренному методу (ГОСТ 10060-2012 [24]) при $t_{\text{замор.}} = (-50 \pm 2) ^\circ\text{C}$; $t_{\text{оттаив.}} = (18 \pm 2) ^\circ\text{C}$ в 5%-ном растворе NaCl:

– партия № 1 (кирпич) соответствует марке F_{2100} , так как через 10 циклов испытания по III методу снижения прочности образцов и значительных повреждений образцов не обнаружено. Фактически наблюдается повышение прочности образцов после испытания $\Delta RF_{100} = +2,3 \%$;

– партия № 2 (плитка) соответствует марке F_{2200} , при которой снижения прочности бетона образцов и значительных повреждений образцов не обнаружено. Фактически наблюдается повышение прочности образцов после испытания $\Delta RF_{150} = +29 \%$, $\Delta RF_{200} = +15,9 \%$.

Выводы

1. Показана возможность получения качественных изделий (кирпич, плитка) из сталеплавильного шлака методом ускоренной карбонизации без использования каких-либо вяжущих веществ, что позволяет применять CO_2 в качестве активатора/вяжущего.

2. Активация углекислым газом нейтрализует оксид кальция и магния, превращая их в карбонаты.

3. Предлагаемая технология изготовления кирпичей и тротуарных плит на основе сталеплавильного шлака методом ускоренной карбонизации позволяет получать изделия с эксплуатационными свойствами, не уступающими изделиям из традиционного бетона. Единственным отличием является высокое водопоглощение – 9,87 для партии 2 (плитка), но с данным водопоглощением образцы прошли испытание на морозостойкость F_{2200} , что является одним из основных факторов, влияющих на долговечность.

4. Изучены проблемы и найдены пути решения, связанные с получением равномерной карбонизации изделий с размером минимальной стороны 60 мм и более (плитка, кирпич).

5. Показаны результаты физико-механических характеристик с разной плотностью свежееотформованных образцов кирпича и плитки.

Список литературы

1. Mien Van Tran, Chanh Van Nguyen. Properties of high strength concrete using steel slag. *Procedia Engineering*. 2014, vol. 9, pp. 95–104.

2. Jian Zheng, Guohua Liu. The Influence and Application of Slag, Fly Ash, and Limestone Flour on Compressive Strength of Concrete Based on the Concrete Compressive Strength Development Over Time (CCSDOT) Model. 2020, 10, 3572.

3. Sherwood P.T., 1995. *Alternative Materials in Road Construction*, 1st Edn., Thomas Telford, London, ISBN-10: 0727730312, p. 163.

4. Воронин К.М., Хамидулина Д.Д., Некрасов С.А., Трубкин И.С. Вибропрессованные элементы мощения с использованием сталеплавильных шлаков // *Строительные материалы*. 2017. № 12. С. 71–73.

5. Sultan A. Tarawneh, Emhaidy S. Gharaibeh and Falah M. Saraireh. Effect of using steel slag aggregate on mechanical properties of concrete. *American Journal of Applied Sciences*. 11(5):700–706, 2014 702 Science Publications <https://www.researchgate.net/publication/280040508doi:10.3844/ajassp.2014.700.706> Published Online 11 (5) 2014 (<http://www.thescipub.com/ajas.toc>).

6. Saravanan J., Suganya N. Mechanical properties of concrete using steel slag aggregate. *International Journal of Engineering Inventions*. 2015, vol. 4, pp. 07-16.10.

7. Ivanka Netinger, Marija Jelcic Rukavina, Ana Mladenovic. Improvement of post-fire properties of concrete with steel slag aggregate. *Procedia Engineering*. 2013, vol. 62, pp. 745-753.2.

8. Корнеева Е.В., Павленко С.И. Композиционное бесцементное вяжущее из промышленных отходов и закладочная смесь на его основе. Москва: Изд-во АСВ, 2009. 140 с.

9. Павленко С.И., Луханин М.В., Аввакумов Е.Г., Мышляев Л.П., Корнеева Е.В. Малоцементные и бесцементные вяжущие и мелкозернистые бетоны различного назначения из вторичных минеральных ресурсов. Новосибирск: СО РАН, 2010. С. 127–228.

10. Корнеева Е.В., Павленко С.И. Состав закладочной смеси. Патент на изобретение RU2348814C1. Оpubл. 10.03.2009.

11. Вайвад А.Я. Магнезиальные вяжущие вещества. Рига: «Знание», 1972. 331 с.

12. Шишкин В.И. Технология строительных изделий из местного сырья и техногенных отходов: Учебное пособие. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2005. 46 с.

13. Горшков В.С., Александров С.Е., Иващенко С.И., Горшкова И.В. Комплексная переработка и использование металлургических шлаков в строительстве: Учебное пособие. Москва: Стройиздат, 1985. 273 с.

14. Байков А.А. Труды в области общей и физической химии. Разложение природных углекислых солей при нагревании: Собрание трудов. Москва–Ленинград: изд. и 1-я тип. Изд-ва Акад. наук СССР в Лгр., 1950. Т. II. С. 565–575.

15. Любомирский Н.В., Бахтин А.С., Бахтина Т.А., Николаенко Е.Ю., Николаенко В.В. Влияние гидрокарбоната кальция на структурообразование и свойства материалов на основе извести карбонатного твердения // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 1 (53). Часть 4. С. 86–93.

16. Бахтина Т.А., Любомирский Н.В., Бахтин А.С., Николаенко Е.Ю. Разработка материала на основе известково-карбонатно-кальциевых композиций для аддитивных технологий // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. № 4. С. 8–15.

17. Любомирский Н.В., Федоркин С.И. Влияние давления углекислого газа на кинетику принудительной карбонизации известкового камня полусухого прессования и формирование его прочности // *Строительство и техногенная безопасность*. 2016. № 3 (55). С. 28–38.

18. Romanenko I., Fadin A. Steelmaking slag-a complex material for the production of small-size materials using hyper-press technology. *Materials Science Forum*. 2021, vol. 1037 (2), pp. 737–742.

19. Romanenko I., Fadin A. Optimization of compositions and hardening conditions of vibropress concretes based on steel-making slag. *Materials Science Forum*. 2021, vol. 1037, pp. 715–720.

20. ГОСТ 8050-85. Двуокись углерода газообразная и жидкая. Технические условия.

21. ГОСТ 12162-77. Двуокись углерода твердая. Технические условия.

22. Романенко И.И., Фадин А.И. Строительные материалы на основе активированного сталеплавильного шлака // *Региональная архитектура и строительство*. 2023. № 1 (54). С. 85–92.

23. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

24. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости.

25. Рузавин А.А. Утилизация сталеплавильных шлаков путем ускоренной карбонизации // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. 2018. Т. 18. № 3. С. 68–72.

References

1. Mien Van Tran, Chanh Van Nguyen. Properties of high strength concrete using steel slag. *Procedia Engineering*. 2014, vol. 9, pp. 95–104.

2. Jian Zheng, Guohua Liu. The Influence and Application of Slag, Fly Ash, and Limestone Flour on Compressive Strength of Concrete Based on the Concrete Compressive Strength Development Over Time (CCSDOT) Model. 2020, 10, 3572.

3. Sherwood P.T., 1995. Alternative Materials in Road Construction, 1st Edn., Thomas Telford, London, ISBN-10: 0727730312, p. 163.

4. Voronin K.M., Khamidulina D.D., Nekrasova S.A., Trubkin I.S. Vibro-pressed elements of paving with the use of steelmaking slags. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2017, no. 12, pp. 71–73. (In Russian).

5. Sultan A. Tarawneh, Emhaidy S. Gharaibeh and Falah M. Sarairoh. Effect of using steel slag aggregate on mechanical properties of concret. *American Journal of Applied Sciences*. 11(5):700–706, 2014 702 Science Publications AJAS <https://www.researchgate.net/publication/280040508doi:10.3844/ajassp.2014.700.706> Published Online 11 (5) 2014 (<http://www.thescipub.com/ajass.toc>).

6. Saravanan J., Suganya N. Mechanical properties of concrete using steel slag aggregate. *International journal of Engineering Inventions*. 2015, vol. 4, pp. 07-16.10.

7. Ivanka Netinger, Marija Jelcic Rukavina, Ana Mladenovic. Improvement of post-fire properties of concrete with steel slag aggregate. *Procedia Engineering*. 2013, vol. 62, pp. 745-753.2.

8. Korneeva E.V., Pavlenko S.I. Composite cement-free binder from industrial waste and a filling mixture based on it. Moscow: ASV Publ., 2009, 140 p. (In Russian).

9. Pavlenko S.I., Lukhanin M.V., Avvakumov E.G., Myshlyaev L.P., Korneeva E.V. Low-cement and cement-free binders and fine-grained concretes for various purposes from secondary mineral resources. Novosibirsk: SB RAS, 2010, pp. 127–228. (In Russian).

10. Korneeva E.V., Pavlenko S.I. Stowage mixture composition. Patent for the invention RU2348814C1. Published 10.03.2009. (In Russian).

11. Vaivad A.Ya. Magnesians binders. Riga: "Knowledge", 1972, 331 p. (In Russian).

12. Shishkin V.I. Technology of construction products from local raw materials and man-made waste: Textbook. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk state technical university, 2005, 46 p. (In Russian).

13. Gorshkov V.S., Alexandrov S.E., Ivashchenko S.I., Gorshkova I.V. Complex processing and use of metallurgical slags in construction: Textbook. Moscow: Stroyizdat Publ., 1985, 273 p. (In Russian).

14. Baykov A.A. Works in the field of general and physical chemistry. Decomposition of natural carbon dioxide salts by heating: Collected works. Moscow–Leningrad: ed. and 1st type. Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR in Lgr., 1950. Vol. II, pp. 565–575. (In Russian).

15. Lyubomirsky N.V., Bakhtin A.S., Bakhtina T.A., Nikolaenko E.Y., Nikolaenko V.V. The effect of calcium bicarbonate on structure and properties of materials based on lime carbonizing hardening. *International Scientific Research Journal*. 2016, no. 11 (53), part 4, pp. 86–93. (In Russian).

16. Bakhtina T.A., Lyubomirskiy N.V., Bakhtin A.S., Nikolaenko E.Yu. Development of a material based on lime-carbonate and calcium compositions for additive technologies. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019, no. 4, pp. 8–15. (In Russian).

17. Lubomirskii N.V., Fedorkin S.I. The influence of carbon dioxide quantity on the kinetics of forced carbonation of half-dry pressure lime stone and shaping its strength. *Construction and technogenic safety magazine*. 2016, no. 3 (55), pp. 28–38. (In Russian).

18. Romanenko I., Fadin A. Steelmaking slag-a complex material for the production of small-size materials using hyper-press technology. *Materials Science Forum*. 2021, vol. 1037 (2), pp. 737–742.

19. Romanenko I., Fadin A. Optimization of compositions and hardening conditions of vibropress concretes based on steel-making slag. *Materials Science Forum*. 2021, vol. 1037, pp. 715–720.

20. State Standard 8050-85. Gaseous and liquid carbon dioxide. Specifications. (In Russian).

21. State Standard 12162-77. Solid carbon dioxide. Specifications. (In Russian).

22. Romanenko I.I., Fadin A.I. Building materials based on activated steel-making slag. *Regional architecture and engineering*. 2023, no. 1 (54), pp. 85–92. (In Russian).

23. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. (In Russian).

24. State Standard 10060-2012. Concretes. Methods for determination of frost-resistance. (In Russian).

25. Ruzavin A.A. Disposal of steelmaking slags by accelerated carbonation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2018, vol. 18, no. 3, pp. 68–72. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Ильич Фадин ✉, аспирант (направление подготовки: 08.06.01 – Техника и технология строительства), Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза
e-mail: Fadin@tulpm.ru

Alexey I. Fadin ✉, postgraduate student (field of study: 06.08.2011 – Engineering and Construction Technology), Penza State University of Architecture and Construction, Penza
e-mail: Fadin@tulpm.ru

Игорь Иванович Романенко, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Механизация и автоматизация производства», Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза
Igor I. Romanenko, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the “Mechanization and Automation of Production” Department, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author