

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)
ISSN 2658-6991 (Online)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 8



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU АВГУСТ 2019 г. (773)

БЕЗ ПРОБЛЕМ



Печи Мерц для обжига извести чрезвычайно эффективны в любой среде.
К тому же они работают в автоматическом режиме. Там где Вы
находитесь немного пустынно? Без проблем: maerz.com



Главный редактор: ЮМАШЕВА Е.И.,
инженер-химик-технолог,
почетный строитель России

Редакционный совет:

РЕСИН В.И.,
председатель, д-р экон. наук,
профессор, академик РААСН (Москва)
АЙЗЕНШТАДТ А.М.,
д-р хим. наук, профессор (Архангельск)
АСКАДСКИЙ А.А.,
д-р хим. наук, профессор (Москва)
БУРЬЯНОВ А.Ф.,
д-р техн. наук, директор Российской
гипсовой ассоциации (Москва)
ВАЙСБЕРГ Л.А.,
д-р техн. наук, профессор,
академик РАН (Санкт-Петербург)
ВЕРЕЩАГИН В.И.,
д-р техн. наук, профессор (Томск)
ГОРИН В.М.,
канд. техн. наук, президент Союза
производителей керамзита
и керамзитобетона (Самара)
ЕРОФЕЕВ В.Т.,
д-р техн. наук, профессор,
академик РААСН (Саранск)
КОРОЛЕВ Е.В.,
д-р техн. наук, профессор (Москва)
КРИВЕНКО П.В.,
д-р техн. наук, профессор (Украина)
ЛЕОНИЧ С.Н.,
д-р техн. наук, профессор (Беларусь)
ЛЕСОВИК В.С.,
д-р техн. наук, профессор,
член-корреспондент РААСН (Белгород)
МУРТАЗАЕВ С.-А.Ю.,
д-р техн. наук, профессор (Грозный)
НЕДОСЕКО И.В.,
д-р техн. наук (Уфа)
ПИЧУГИН А.П.,
д-р техн. наук, профессор
(Новосибирск)
ПУХАРЕНКО Ю.В.,
д-р техн. наук, профессор,
член-корреспондент РААСН
(Санкт-Петербург)
ТРАВУШ В.И.,
д-р техн. наук, академик РААСН
(Москва)
ФЕДОСОВ С.В.,
д-р техн. наук, профессор,
академик РААСН (Иваново)
ФИШЕР Х.-Б.,
доктор-инженер (Германия)
ХОЗИН В.Г.,
д-р техн. наук, профессор (Казань)
ЧЕРНЫШОВ Е.М.,
д-р техн. наук, профессор,
академик РААСН (Воронеж)
ШЕБЛ С.М.,
д-р наук, профессор (Египет)
ШЛЕГЕЛЬ И.Ф.,
канд. техн. наук (Омск)
ШТАКЕЛЬБЕРГ Д.И.,
д-р техн. наук, профессор (Израиль)
ЯКОВЛЕВ Г.И.,
д-р техн. наук, профессор (Ижевск)
Ю ЖЯНГМЯО,
д-р философии (Китай, Гуанчжоу)

Силикатные строительные материалы

А.А. СЕМЁНОВ

Силикатный кирпич и газосиликат.

Некоторые тенденции рынка в 2018–2019 гг. 3

В.В. НЕЛЮБОВА, В.В. СТРОКОВА

Технология силикатных прессованных материалов.

Обзор новаций для развития производства 6

Г.В. КУЗНЕЦОВА

**Дробление извести в производстве известково-кремнеземистого вяжущего
на действующих заводах силикатного кирпича. 14**

**Компания Masa и производитель силикатных строительных материалов:
альянс для повышения производительности и качества
продукции (Информация) 18**

Энергоэффективнее, быстрее, тише: серводвигатели

оптимизируют работу прессов для изготовления силикатных

изделий (Информация) 22

А.Ю. СТОЛБОУШКИН

**Получение силикатных материалов с добавкой тонкомолотого
мартековского шлака 26**

Известь негашеная и гашеная в строительстве (Информация) 34

В.П. ВЫЛЕГЖАНИН, В.А. ПИНСЕР

**Влияние пористости автоклавного газобетона на его теплопроводность
и пути ее изменения за счет совершенствования подбора**

сырьевых компонентов 36

О.И. ПОНОМАРЕВ, А.М. ГОРБУНОВ, М.В. КОРНЕВ

**Особенности проектирования несущих и ограждающих конструкций
из силикатных кладочных изделий (Информация) 39**

М. АБДУЛМАДЖИД, М. КАССАБ, Х. ШУКРИ, С. ТАХА

Инновационные композитные материалы для укрепления

известковых растворов в традиционных каменных конструкциях 42

Результаты научных исследований

А.И. ПАНЧЕНКО, И.Я. ХАРЧЕНКО, С.В. ВАСИЛЬЕВ

Долговечность бетонов с компенсированной химической усадкой. 48

А.А. АСКАДСКИЙ, Т.А. МАЦЕЕВИЧ, В.И. КОНДРАЩЕНКО

Модификация материалов ДПК путем введения

пластификатора диоктилфталата. 54

Д.В. ТОПЧИЙ, А.Ю. ЮРГАЙТИС, М.-Б.Х. КОДЗОЕВ, И.М. ХАЛИУЛЛИН

**Тензометрический мониторинг напряженно-деформированного состояния
конструкций подземной части зданий и сооружений при научно-техническом
сопровождении объектов строительства и перепрофилирования. 60**

А.П. КОНСТАНТИНОВ, А.А. КРУТОВ, А.М. ТИХОМИРОВ

**Оценка теплозащитных характеристик оконных блоков из ПВХ профилей
в зимний период эксплуатации 65**

Founder of the journal:
 «STROYMATERIALY»
 Advertising-Publishing Firm, OOO
 Registration certificate PI № 77–1989
 Included in the list of journals of
 the Higher Attestation Commission
 (Russia), Project Russian Science
 Citation Index (Russia), Russian
 Science Citation Index on the platform
 Web of Science

Editorial address:
 9/3 Dmitrovskoye Highway,
 127434, Moscow, Russian Federation

STROITEL'NYYE MATERIALY®

Founded in 1955

№8

(773) August 2019

Tel.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36

mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Editor-in-chief YUMASHEVA E.,
 engineer-chemist-technologist,
 Honorary Builder of Russia

Editorial Board

RESIN V.,
 Chairman, Doctor of Science (Economy),
 Professor (Moscow)

AYZENSHTADT A.,
 Doctor of Sciences (Chemistry),
 Professor (Arkhangelsk)

ASKADSKIY A.,
 Doctor of Science (Chemistry),
 Professor (Moscow)

BUR'YANOV A.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Director of the Russian Association
 of gypsum (Moscow)

VAYSBERG L.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Academician of RAS (St. Petersburg)

VERESHCHAGIN V.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Professor (Tomsk)

GORIN V.,
 Candidate of Science (Engineering),
 President of the Union of Haydite and
 Haydite Concrete Producers (Samara)

EROFEEV V.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Professor, Academician of RAACS (Saransk)

KOROLEV E.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Professor (Moscow)

KRIVENKO P.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Professor (Ukraine)

LEONOVICH S.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Professor (Belarus, Minsk)

LESOVIK V.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Corresponding Member of RAACS
 (Belgorod)

MURTAZAEV S. A.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Professor (Grozny)

NEDOSEKO I.,
 Doctor of Science (Engineering),
 (Ufa, Bashkortostan)

PICHUGIN A.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Professor, Member of the Russian
 Academy of Natural Science (Novosibirsk)

PUKHARENKO Yu.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Professor (St. Petersburg)

TRAVUSH V.,
 Doctor of Science (Engineering),
 academician of RAACS (Moscow)

FEDOSOV S.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Professor, Academician of RAACS (Ivanovo)

FISHER H. -B.,
 Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

KHOZIN V.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Professor (Kazan)

CHERNYSHOV E.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Professor, Academician of RAACS
 (Voronezh)

SHEBL S. M.,
 Doctor of Science, Professor (Egypt)

SHLEGEL I.,
 Candidate of Science (Engineering),
 OOO «INTA-Stroy» (Omsk)

SHTACKELBERG D.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Professor (Israel)

YAKOVLEV G.,
 Doctor of Science (Engineering),
 Professor (Izhevsk)

YU JIANGMIAO,
 PhD / Associate Professor
 (China, Guangzhou)

Silicate building materials

A.A. SEMENOV

Silicate Brick and Gas Silicate. Some Trends at the Market in 2018–2019.....3

V.V. NELYUBOVA, V.V. STROKOVA

Technology of Silicate Pressed Materials.

Review of Innovations for the Development of Production6

G.V. KUZNETSOVA

Crushing of lime in the production of lime-silica binder

at operating plants of silicate bricks14

Masa Company and Manufacturer of Silicate Building Materials:

Alliance to Improve Productivity and Product Quality (Information)18

More Energy Efficient, Faster, Quieter: Servo Motors Optimize the Operation

of Presses For the Manufacture of Silicate Products (Information)22

A.Yu. STOLBOUSHKIN

Production of Silicate Materials with Addition of Fine-Ground Open-Hearth

Furnace Slag26

Quicklime and Slaked Lime in Construction (Information)34

V.P. VYLEGZHANIN, V.A. PINSKER

Influence of Porosity of Autoclaved Gas Concrete on Its Thermal Conductivity

and Ways of Its Change Due To Improvement in Selection of Raw Components.....36

O.I. PONOMAREV, A.M. GORBUNOV, M.V. KORNEV

Design Specialties of Load Bearing and Separating Silicate

Units Masonry Structures (Information)39

M. ABDELMEGEED, M. KASSAB, H. SHOUKRY, S. TAHA

Innovative Composite Materials for Strengthening Lime-based Mortars

in Traditional Masonry Structures42

Results of scientific research

A.I. PANCHENKO, I.Ya. HARCHENKO, S.V. VASILIEV

Durability of concretes with compensated chemical shrinkage.....48

A.A. ASKADSKII, T.A. MATSEEVICH, V.I. KONDRASHCHENKO

Modification Of WPC Materials By Introduction Of Diethylphthalate Plasticizer54

D.V. TOPCHY, A.Y. YURGAYTIS, M.-B.Kh. KODZOEY, I.M. KHALIULLIN

Tensometric Monitoring of Stress-Strain State of Structures of the Underground Part

of Buildings and Structures at Scientific and Technical Support of Construction

and Conversion Facilities.....60

A.P. KONSTANTINOV, A.A. KRUTOV, A.M. TIKHOMIROV

Assessment of the PVC Window Thermal Characteristics in Winter64

А.Ю. СТОЛБОУШКИН, д-р техн. наук (stanyr@list.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Получение силикатных материалов с добавкой тонкомолотого мартеновского шлака

Показана необходимость расширения местной сырьевой базы для производства силикатных строительных материалов за счет техногенного алюмосиликатного сырья. Исследованы химико-минералогический состав и возможность тонкого измельчения отвального мартеновского шлака сталелитейного производства. Основными минеральными фазами шлака являются мелилит, кирштейнит, магнезиоферрит, вюстит, периклаз и форстерит. По данным ситового анализа установлено, что 50–58% шлака приходится на фракции более 5 мм. Определены оптимальные параметры двухстадийного измельчения шлака, включая грубое дробление до фракции менее 10 мм и тонкий помол в течение 50–60 мин до фракции 100–300 мкм. По химическому составу (около 50% приходится на щелочно-земельные оксиды) и наличию гидравлически активных минералов предложено использование шлака в качестве основного компонента известково-кремнеземистого вяжущего в технологии силикатного кирпича. Выявлено влияние добавки тонкомолотого шлака в составе автоклавного вяжущего на физико-механические свойства силикатных образцов. Установлено, что введение в состав автоклавного вяжущего 15–25% измельченного отвального мартеновского шлака взамен кальцевой воздушной извести обеспечивает прирост прочности при сжатии силикатных образцов на 15–20%. Экспериментально установлен оптимальный состав автоклавного вяжущего с использованием тонкомолотого мартеновского шлака, обеспечивающий прочность силикатных прессованных материалов не ниже 25–30 МПа.

Ключевые слова: отвальный мартеновский шлак, известково-кремнеземистое вяжущее, автоклавная обработка, гидротермальный синтез, силикатный кирпич.

Для цитирования: Столбоушкин А.Ю. Получение силикатных материалов с добавкой тонкомолотого мартеновского шлака // *Строительные материалы*. 2019. № 8. С. 26–32. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-26-32>

A.Yu. STOLBOUSHKIN, Doctor of Sciences (Engineering) (stanyr@list.ru)

Siberian State Industrial University (42, Kirova Street, Novokuznetsk, 654007, Russian Federation)

Production of Silicate Materials with Addition of Fine-Ground Open-Hearth Furnace Slag

The necessity of expanding the local raw material base for the production of silicate building materials due to anthropogenic alumino-silicate raw materials is shown. The chemical-mineralogical composition and the possibility of fine grinding of open-hearth furnace slag of steelmaking are investigated. The major mineral phases of the slag are melilite, kirschsteinite, magnesioferrite, wustite, periclase and forsterite. According to the sieve analysis it was found that 50–58% of the slag falls on the fraction of more than 5 mm. The optimal parameters of two-stage slag grinding, including coarse crushing to a fraction of less than 10 mm and fine grinding for 50–60 minutes to a fraction of 100–300 microns are determined. By chemical composition (about 50% of alkaline earth oxides) and the presence of hydraulically active minerals it is proposed to use the slag as the main component of lime-silica binder in the technology of silicate bricks. The influence of the addition of fine slag in the autoclave binder on the physical and mechanical properties of silicate samples was revealed. It is established that the introduction of 15–25% of crushed open-hearth furnace slag instead of calcium air lime into the autoclave binder composition provides an increase in the compressive strength of silicate samples by 15–20%. The optimum composition of the autoclaved binder with the use of a finely ground open-hearth furnace slag which provides the strength of silicate compacted material not below 25–30 MPa is experimentally established.

Keywords: dump open-hearth furnace slag, lime-silica binder, autoclave treatment, hydrothermal synthesis, silicate brick.

For citation: Stolboushkin A.Yu. Production of silicate materials with addition of fine-ground open-hearth furnace slag. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 8, pp. 26–32. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-26-32>

После устойчивого подъема в нулевых годах производство кирпича в России претерпело два кризисных минимума, связанных с мировыми политическими событиями 2008 и 2014 гг. В результате по объемам производства отрасль откатилась примерно на уровень 2008 г. [1]. Снижение спроса на кирпичную продукцию также вызвали вынужденные изменения в конструкциях стен и структуре материалов, применяемых для жилых зданий в свете новых теплотехнических требований [2]. Таким образом, за последнее десятилетие доля жилых домов с кирпичными стенами снизилась практически на 10% и составила одну треть от общего объема возводимого жилья [3].

Несмотря на уменьшение количества мелкоштучных стеновых материалов, поставляемых на рынок, в

последние годы наблюдается тенденция развития современного производства силикатных изделий. В 2017 г. их выпуск составил порядка 2 млрд шт. в пересчете на условный кирпич [3]. Учитывая то обстоятельство, что одним из сдерживающих факторов повсеместного развития производства силикатного кирпича является отсутствие местной сырьевой базы, актуальным является поиск новых видов природного и техногенного алюмосиликатного сырья.

Для современных индустриальных регионов России характерно интенсивное накопление крупнотоннажных промышленных отходов, объемы которых возрастают с каждым годом [4–7]. Например, на юге Кузбасса в результате многолетней работы двух градообразующих металлургических комбинатов в Новокузнецке накоплены десятки миллионов

Таблица 1

Химический состав отвального мартеновского шлака

№ пробы шлака	Массовое содержание, % (на абсолютно сухое вещество)										
	Fe _{общ}	MnO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	S	P ₂ O ₅
16-3094	13,79	2,76	32,35	27,17	7,57	15,49	0,24	0,32	0,5	0,2	0,55
16-3095	14,53	3,44	32,44	27,94	6,56	14,91	0,21	0,21	0,5	0,18	0,78
16-3096	12,88	3,15	31,46	23,68	7,22	14,1	0,21	0,31	0,48	0,19	0,5

Таблица 2

Гранулометрический состав отвального мартеновского шлака

№ пробы шлака	Частные остатки в % на ситах с размером отверстий, мм										Сумма, %
	>40	20–40	10–20	5–10	2,5–5	1,2–2,5	0,63–1,2	0,315–0,63	0,14–0,315	<0,14	
16-3094	6,9	5,9	13,4	23,2	27,8	12,4	2,5	2,6	3,3	2	100
16-3095	7,6	4,6	18,2	27,9	22,4	8,7	3,3	2,4	1,8	3,1	100
16-3096	5,9	7,8	15,6	21,4	25,5	11	2,2	3,2	4,8	2,6	100

Таблица 3

Результаты рентгенофазового анализа отвального мартеновского шлака

Минеральная фаза	Межплоскостные расстояния (d/n), нм					
Мелилит (Ca,Na) ₂ ·(Mg,Al)·[(Si,Al) ₂ O ₇]*	0,307	0,239	0,194	0,185	0,14	0,137
Кирштейнит CaFe·SiO ₄	0,551	0,387	0,278	0,183	0,173	0,143
Магнезиоферрит Mg·Fe ₂ O ₄	0,296	0,252	0,209	–	–	–
Вюстит FeO	0,246	0,215	0,151	–	–	–
Периклаз MgO	0,249	0,212	0,148	–	–	–
Форстерит Mg ₂ ·SiO ₄	0,506	0,305	0,286	0,181	0,16	0,15
Гематит α-Fe ₂ O ₃	0,366	0,271	0,268	0,252	0,168	0,159
Кальцит CaCO ₃	0,303	0,191	0,187	0,161	–	–
Феррошпинель (Fe,Mg,Mn)O·Fe ₂ O ₃	0,487	0,294	0,241	0,21	–	–
Бредигит Ca ₇ Mg·(SiO ₄) ₄ *	0,274	0,229	–	–	–	–
Кварц SiO ₂	0,334	0,245	0,192	–	–	–

Примечание. * Гидравлически активные минералы.

тонн отвальных шлаков металлургического производства, ухудшающих экологическую обстановку в городе [8]. Как правило, отходы сталелитейного производства имеют алюмосиликатную природу и могут содержать до 80% углекислого кальция в виде силикатов щелочно-земельных металлов [9, 10]. Высокое содержание оксидов кальция и магния и гидравлически активных минералов в отвальных мартеновских шлаках предполагает их эффективное использование в качестве сырьевых компонентов для неавтоклавных и автоклавных вяжущих в технологии цементов и силикатных строительных материалов [11–13]. Однако основными препятствиями на пути эффективного использования отвальных сталеплавильных шлаков в производстве строительной продукции являются непостоянство химического, гранулометрического и минералогического состава отходов, наличие металлических включений и др., что ограничивает их применение в производстве вяжущих силикатных материалов [13, 14].

Целью работы являлось исследование отвальных мартеновских шлаков Западно-Сибирского металлургического комбината (ЗСМК) при изготовлении автоклавных вяжущих для технологии силикатного кирпича.

Методы исследований

Исследования проводились в лаборатории строительных материалов и центре коллективного пользования «Материаловедение» Сибирского государственного индустриального университета, в лаборатории научно-образовательного центра Н.М. Кижнера Национального исследовательского Томского политехнического университета. Химический состав мартеновских шлаков ЗСМК определен методом рентгенофлуоресцентного волнодисперсионного анализа на спектрометре Shimadzu XRF-1800. Гранулометрический состав определен методами ситового анализа и дифракции лазерного излучения суспензий на лазерном анализаторе Mastersizer 2000.

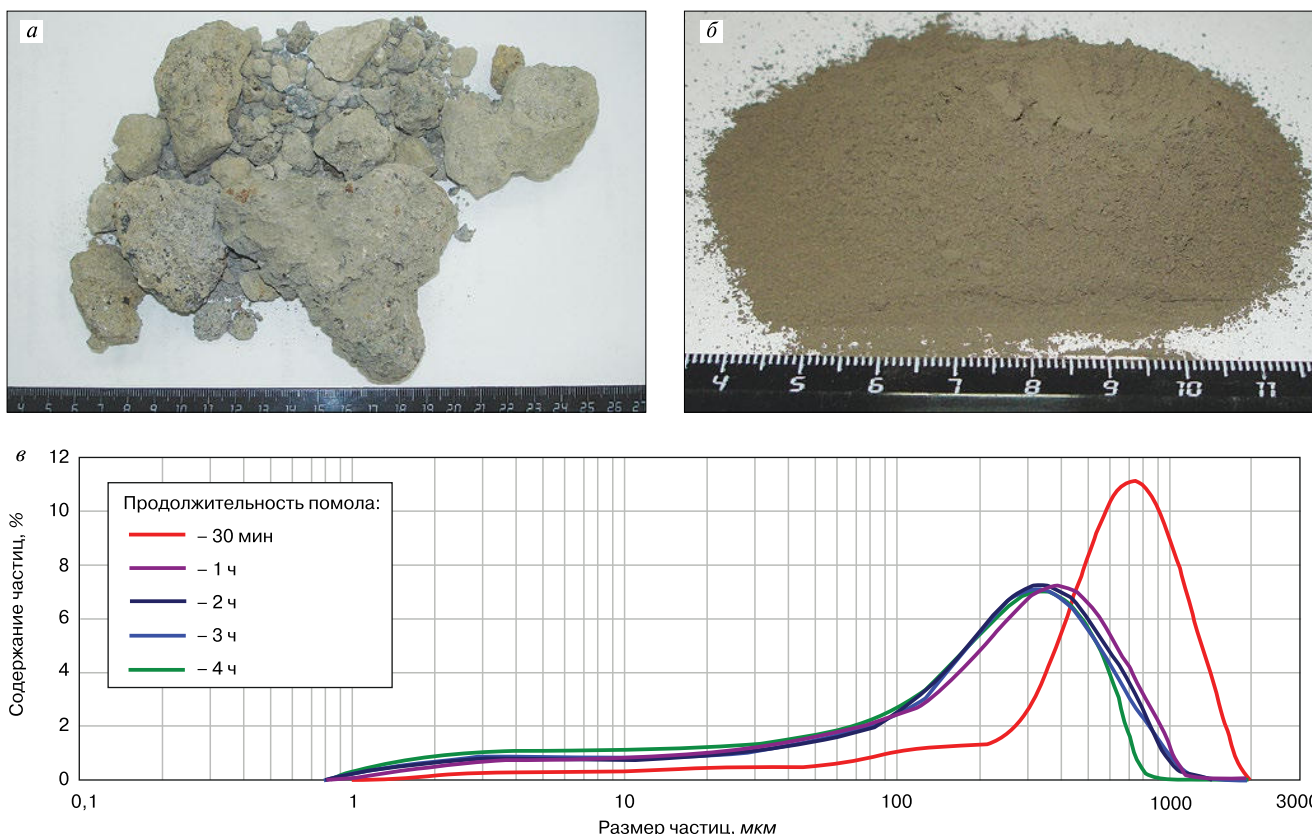


Рис. 1. Отвальный мартековский шлак в естественном состоянии (а); то же после помола в стержневой мельнице в течение 1 ч (б); распределение частиц шлака по размерам в зависимости от продолжительности помола (в)

Рентгенофазовый анализ образцов мартековского шлака ЗСМК выполнен на порошковом дифрактометре ShimadzuXRD-6000 в медном излучении с графитовым монохроматором. Первичный поиск минеральных фаз шлака выполнен по картотеке PDF-2 (ICCD).

Объекты исследований

В работе использовался отвальный мартековский шлак АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». Для тонкомолотых известково-кремнеземистых композиций различного состава применялись кальциевая воздушная строительная известь I-го сорта по ГОСТ 9179–2018 «Известь строительная. Технические условия» и кварцевый песок с содержанием несвязанного кварца 79–82%, соответствующий требованиям действовавшего ранее ОСТ 21-1–80 «Песок для производства силикатного кирпича и изделий из автоклавных бетонов». Исследовались отпрессованные образцы-цилиндры после гидротермальной обработки в автоклаве.

Обсуждение результатов исследований

Химический, гранулометрический и минеральный составы представительных проб отвального мартековского шлака, отобранных ООО «Технологии рециклинга» (Новокузнецк), представлены в табл. 1–3.

Химический состав исследуемых проб отвального мартековского шлака примерно одинаков. Разброс

по количеству кремнезема, составляющего четверть материала, не превышает 4 мас. %. Суммарное содержание щелочно-земельных оксидов (CaO, MgO) в представленных пробах изменяется от 45,56 до 47,84%. Изменение общего содержания железа и глинозема не превышает 1–1,5%, а по остальным оксидам – десятые и сотые доли процента (табл. 1). Таким образом, при организации участка по переработке, усреднению и контролю состава отвальных шлаков можно прогнозировать постоянство свойств строительных материалов на их основе.

Гранулометрический состав. Разброс фракций в пробах исходного шлака также незначительный (табл. 2). Материал грубодисперсный, встречаются крупные куски размером до 50–70 мм (рис. 1, а). Ситовой анализ показал, что 50–58% шлака приходится на фракции более 5 мм и только 10–12% – на фракции менее 1 мм.

Минералогический состав. Неполная кристаллизация минералов отвального мартековского шлака подтверждается небольшой интенсивностью линий на всех рентгеновских дифрактограммах образцов. По данным анализа межплоскостных расстояний (табл. 3), в образцах шлака диагностируются следующие минеральные фазы: мелилит, кирштейнит, магнезиоферрит, вюстит, периклаз и форстерит. В качестве примесей идентифицируются гематит, кальцит, феррошпинель, бредигит и кварц. По характерному гало вероятно присутствие рентгеноаморфного вещества.



Рис. 2. Автоклав в собранном виде (а); загрузка образцов в автоклав (б); силикатные образцы с различным содержанием мартеновского шлака (в)

Группа $(Ca,Na)_2 \cdot (Mg,Al) \cdot [(Si,Al)_2O_7]$ представлена в основном изоморфной смесью геленита $Ca_2Al_2SiO_7$ и окерманита $Ca_2MgSi_2O_7$ с примесями Mn^{2+} и Fe^{2+} . Так как эти минералы являются изоструктурными, можно предположить, что на группу мелилита приходится порядка 30–40% из общей массы минералов в образцах шлака [13]. Кальцит является продуктом взаимодействия оксида кальция с атмосферным углекислым газом или образуется при разрушении шлаковых минералов сложного состава в процессе старения и кристаллизации отвалного шлаков.

Подготовка шлакового компонента. С учетом исходной гранулометрии отвалного шлака усредненную пробу предварительно высушенного материала подвергали грубому дроблению в лабораторной щековой дробилке до фракции не более 10 мм. Тонкое измельчение проводили в лабораторной мельнице стержневого типа. При этом последовательно изменяли продолжительность помола в интервале 0,5–4 ч. Результаты лазерной гранулометрии измельченного порошка (рис. 1, б) показали, что увеличение времени его помола более одного часа практически не приводит к изменению интегральных кривых распределения частиц шлака (рис. 1, в).

Таким образом, оптимальная механоактивация отвалного мартеновского шлака включает двухстадийное измельчение: грубое дробление в щековой дробилке до фракции ≤ 10 мм; тонкий помол в стержневой или шаровой мельнице камерного типа в течение 50–60 мин до фракции с преимущественным размером 100–300 мкм [15].

Приготовление силикатных образцов. По автоклавной технологии были изготовлены силикатные образцы-цилиндры из песка и известково-кремнеземистого вяжущего (ИКВ). В качестве ИКВ применялись двух- и трехкомпонентные смеси из извести, песка и отвалного мартеновского шлака. Учитывая высокий модуль основности шлака [16] $M_o = 0,97–1,04$ (табл. 1), во всех составах кварцевый песок использовался как кремнеземистый компонент в количестве 50 мас. %. Состав сырьевых смесей для приготовления ИКВ приведен в табл. 4.

Известково-кремнеземистое вяжущее готовилось путем совместного помола сырьевых компонентов в сухом состоянии в шаровой мельнице в течение 1–1,5 ч.

Для приготовления образцов использовалась смесь песка и ИКВ с постоянным соотношением компонентов по массе 70:30. Перемешивание компонентов смеси до однородного состояния проводилось в турболопастном смесителе-грануляторе с одновременной подачей воды для гашения извести из расчета 60–70% от массы известкового компонента. Продолжительность процесса грануляции составляла 5–10 мин в зависимости от количества извести в автоклавном вяжущем. После вылеживания приготовленной смеси в течение 30 мин для полного гашения $CaO + MgO$ проводили контроль влажности и при необходимости доувлажнение смеси до формовочной влажности 7–8%.

Из полученных смесей с разным составом ИКВ (табл. 4) было отпрессовано шесть серий по 5–6 образцов-цилиндров диаметром 50 мм и высотой

Таблица 4

Компонентный состав смесей для приготовления известково-кремнеземистого вяжущего

Сырьевые материалы	Массовое содержание компонента, %, в составе смеси в зависимости от порядкового номера состава ИКВ					
	1	2	3	4	5	6
Известь	50	40	30	20	10	–
Песок	50	50	50	50	50	50
Мартеновский шлак	–	10	20	30	40	50

Таблица 5

Физико-механические свойства силикатных образцов

№ серии образцов*	Средняя плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент конструктивного качества	Примечание
1	1866	11,3	28,6	15,3	
2	1943	10,5	32,1	16,5	
3	1983	9,4	33,9	17,1	
4	2006	9,9	30,3	15,1	
5	2033	10,2	26,2	12,9	
6	2011	–	3,7	1,8	Выкрашивание граней после автоклавной обработки

Примечание. * Номер серии соответствует порядковому номеру состава ИКВ (табл. 4).

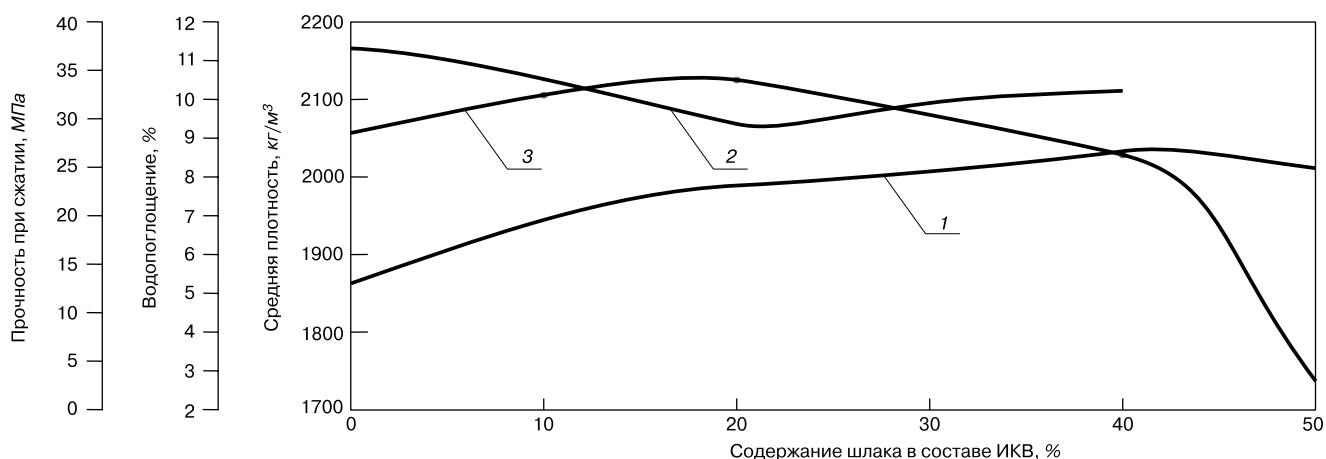


Рис. 3. Зависимость физико-механических свойств силикатных образцов от количества мартеновского шлака в составе ИКВ: 1 – средняя плотность; 2 – водопоглощение; 3 – прочность при сжатии

45–55 мм. Прессование образцов проводилось на гидравлическом прессе при удельном давлении 20 МПа. Режим прессования двухступенчатый с изобарической выдержкой и односторонним приложением нагрузки. Соотношение скоростей прикладываемого давления на первой и второй ступенях составляло примерно 1:4 для лучшего удаления воздуха из прессовки.

После прессования образцы подвергались автоклавной обработке (рис. 2). Автоклавирование проводилось по следующему режиму: 2 ч – подъем температуры до 180–190°C и давления до 0,8–0,9 МПа; 8 ч – выдержка при рабочих параметрах давления и температуры перегретого пара; 2 ч – сброс давления и охлаждение образцов. Извлеченные из автоклава

образцы высушивались до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 100°C.

Результаты испытаний и графическая зависимость изменения физико-механических свойств силикатных образцов от состава компонентов ИКВ приведены в табл. 5 и на рис. 3.

После автоклавной обработки силикатные образцы имели окраску серого цвета, которая темнеет с увеличением количества мартеновского шлака в составе известково-кремнеземистого вяжущего (рис. 2, в). У образцов-цилиндров 1–5-й серий можно отметить гладкую ровную поверхность без трещин и других видимых дефектов. На образцах 6-й серии с ИКВ без известкового компонента (табл. 4) со стороны торцов наблюдалось выкраши-

вание граней. Практически все образцы этой серии имели низкую механическую прочность (менее 4 МПа) и не прошли испытания на водостойкость, что косвенно свидетельствует об отсутствии реакций гидротермального синтеза, протекающих при автоклавной обработке в присутствии гидроокиси кальция.

Анализ зависимости изменения физико-механических свойств силикатных образцов (рис. 3) показал, что их средняя плотность возрастает с увеличением количества мартеновского шлака в составе известково-кремнеземистого вяжущего. Максимальную прочность (32–35 МПа) имеют образцы с 20% содержанием тонкомолотой шлаковой добавки от массы вяжущего. Несмотря на снижение количества активной СаО в ИКВ с 50 до 30 мас. %, для этой серии также характерно минимальное водопоглощение образцов (порядка 9%). Это подтверждает оптимальный смесевой фактор трехкомпонентного ИКВ (песок:известь:шлак = 50:30:20), обеспечивающий наилучшие условия для протекания процесса гидротермального синтеза.

Высокий модуль основности и значительное количество гидравлически активных минералов в мартеновском шлаке (табл. 3) позволяют заменять им классический компонент ИКВ – воздушную кальциевую известь (до 80% от массы известкового компонента). При этом можно отметить сопоставимые значения коэффициента конструктивного качества для образцов 1–4-й серий (порядка 15–17), характеризующего оптимальную структурную организацию силикатного материала. Значительное падение его структурной прочности начинается только при содержании оксида кальция в количестве менее 10 мас. % автоклавного вяжущего (менее 20% от массы известкового компонента).

Таким образом, экспериментально установлен оптимальный состав автоклавного вяжущего с ис-

пользованием тонкомолотого отвального мартеновского шлака, обеспечивающий прочность силикатных прессованных материалов не менее 25–30 МПа (мас. %):

- песок 45–50;
- известь 10–40;
- шлак 15–40.

Заключение

Исследованы химико-минералогический состав и возможность тонкого измельчения отвального мартеновского шлака ЗСМК. Выявлено влияние добавки тонкомолотого мартеновского шлака в составе автоклавного вяжущего на физико-механические свойства силикатных образцов.

Определены оптимальные параметры двухстадийного измельчения шлака: грубое дробление до фракции ≤10 мм; тонкий помол в течение 50–60 мин до фракции 100–300 мкм. Установлен минеральный состав отвального мартеновского шлака: мелилит, кириштейнит, магнезиоферрит, вюстит, периклаз и форстерит. В качестве примесей идентифицируются гематит, кальцит, феррошпинель, бредигит и кварц.

По химическому составу (около 50% приходится на щелочно-земельные оксиды) и наличию гидравлически активных минералов предложено использование шлака в качестве основного компонента автоклавного вяжущего. Установлено, что введение в состав известково-кремнеземистого вяжущего 15–25% измельченных отвальных мартеновских шлаков взамен кальциевой воздушной извести обеспечивает прирост прочности при сжатии образцов в среднем на 15–20%.

Результаты комплексных исследований структуры и фазового состава полученных силикатных материалов с добавкой тонкомолотого мартеновского шлака будут рассмотрены в отдельной статье.

Список литературы

1. Российский рынок керамических стеновых материалов в 2016 году // *Строительные материалы*. 2017. № 4. С. 4–5.
2. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Требования к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализированного СНИП «Тепловая защита зданий» // *Жилищное строительство*. 2011. № 8. С. 2–6.
3. Семёнов А.А. Тенденции развития кирпичной промышленности и кирпичного домостроения в России // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 49–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-49-51>
4. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2009 году». Российская Федерация. Министерство природных ресурсов и экологии. Москва, 2010. <http://www.mnr.gov.ru/upload/>

References

1. Russian Market of Ceramic Wall Materials in 2016. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 4, pp. 4–5. (In Russian).
2. Gagarin V.G., Kozlov V.V. Requirements for thermal protection and energy efficiency in the draft of the updated SNiP «Thermal Protection of Buildings». *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2011. No. 8, pp. 2–6. (In Russian).
3. Semenov A.A. Trends in development of brick industry and brick housing construction in Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No.8, pp.49–51. DOI:<https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-49-51> (In Russian).
4. State report «About the state and environmental protection of the Russian Federation in 2009». Russian Federation. Ministry of Natural Resources and Ecology. Moscow: Minprirody of Russia. 2010. http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/2b1/6158_os-



- iblock/2b1/6158_osdoklad_-2009.zip (дата обращения 25.04.2019).
5. Петров И.В., Савон Д.Ю. Эколого-экономический подход в сфере обращения с отходами производства в регионе // *Экология. Природопользование. Экономика: Материалы международной конференции МГГУ*. Москва, 2013. С. 43–56.
6. Ляшенко В.И., Дятчин В.З. Охрана окружающей среды в регионах добычи и переработки руд // *Экология производства*. 2013. № 3. С. 56–59.
7. Рахимов Р.З., Магдеев У.Х., Ярмаковский В.Н. Экология, научные достижения и инновации в производстве строительных материалов на основе и с применением техногенного сырья // *Строительные материалы*. 2009. № 12. С. 8–11.
8. В Новокузнецке функционируют два комбината полного металлургического цикла // *Муниципальный сайт города Новокузнецк. Раздел 17. Экологическая обстановка в г. Новокузнецк. Характеристика загрязнения атмосферы*. <http://admnkz.ru/actionDocument.do?id=51922> (дата обращения 25.04.2019).
9. Мамаев К.А., Митрофанов А.М. Основы агрохимии и применение ядохимикатов. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высшая школа, 1975. 168 с.
10. Евтушенко Е.И. Комплексная переработка металлосодержащих отходов. Белгород: БелГТАСМ, 1996. 60 с.
11. Лесовик В.С., Шейченко М.С., Алфимова Н.И. Композиционные вяжущие с использованием высокомагнезиальных отходов Ковдорского месторождения // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2011. № 1. С. 10–14.
12. Панфилов М.И. и др. Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии / М.: Металлургия, 1987. 238 с.
13. Хоботова Э.Б., Калмыкова Ю.С. Эколого-химическое обоснование утилизации отвальных доменных шлаков в производстве вяжущих материалов // *Экологическая химия*. 2012. № 21 (1). С. 27–37.
14. Шаповалов Н.А., Загороднюк Л.Х., Тикунова И.В., Шекина А.Ю. Рациональные пути использования сталеплавильных шлаков // *Фундаментальные исследования. Технические науки*. 2013. № 1. С. 439–443.
15. Шевченко В.В., Акст Д.В., Столбоушкин А.Ю. Исследование отвального мартеновского шлака до и после активации в мельнице стержневого типа для получения строительных материалов. *Перспективы развития фундаментальных наук: Материалы XIV международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 6. Строительство и архитектура*. Томск: ТПУ, 2017. С. 77–79.
16. Перепелицын В.А. Основы технической минералогии и петрографии. М.: Недра, 1987. 256 с.
- doklad_-2009.zip (дата обращения 25.04.2019). (In Russian).
5. Petrov I.V., Savon D.Yu. Ecological and economic approach in the field of waste management in the region. *Ecology. Nature management. Economics: Proceedings of the Moscow State University for the Humanities*. Moscow: MSMU. 2013. pp. 43–56. (In Russian).
6. Lyashenko V.I., Dyatchin V.Z. Environmental protection in the regions of ore mining and processing. *Ekologiya proizvodstva*. 2013. No. 3, pp. 56–59. (In Russian).
7. Rakhimov R.Z., Magdeev U.Kh., Yarmakovskiy V.N. Ecology, scientific achievements and innovations in the production of building materials based on and with the use of technogenic raw materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 12, pp. 8–11. (In Russian).
8. There are two plants of the full metallurgical cycle in Novokuznetsk city. *Municipal website of the city of Novokuznetsk. Section 17. Ecological situation in the city of Novokuznetsk. Characteristics of air pollution*. 2019. <http://admnkz.ru/actionDocument.do?id=51922>. (Date of access 25.04.2019).
9. Mamaev K.A., Mitrofanov A.M. Osnovy agrohimii i primeneniye yadokhimikатов [Fundamentals of agrochemistry and chemical pesticides appliance]. Moscow: Vysshaya shkola. 1975. 168 p.
10. Evtushenko E.I. Kompleksnaya pererabotka metallosoderzhashchih othodov [Complex processing of metal-containing waste]. Belgorod: BelGATASM. 1996. 60 p.
11. Lesovik V.S., Sheychenko M.S., Alfimova N.I. Composite binders using high magnesian waste from the Kovdorsky deposit. *Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2011. No. 1, pp. 10–14. (In Russian).
12. Panfilov M.I. et al. Kompleksnaya pererabotka metallosoderzhashchih othodov [Slag processing and waste-free technology in metallurgy]. Moscow: Metallurgiya. 1987. 238 p.
13. Khabotova E.B., Kalmykova Yu.S. Ecological and chemical justification for the disposal of waste blast furnace slag in the production of binders. *Ekologicheskaya himiya*. 2012. No. 21 (1), pp. 27–37. (In Russian).
14. Shapovalov N.A., Zagorodniuk L.Kh., Tikunova I.V., Shekina A.Yu. Rational ways of using steelmaking slag. *Fundamental'nye issledovaniya. Tekhnicheskie nauki*. 2013. No. 1, pp. 439–443. (In Russian).
15. Shevchenko V.V., Akst D.V., Stolboushkin A.Yu. Investigation of dump open-hearth slag before and after activation in a rod-type mill to obtain building materials. *Prospects for the development of basic sciences: Materials of the XIV international conference of students, graduate students and young scientists*. Tomsk: TPU. 2017. pp. 77–79. (In Russian).
16. Perepelitsyn V.A. Osnovy tekhnicheskoy mineralogii i petrografii [Fundamentals of technical mineralogy and petrography]. Moscow: Nedra. 1987. 256 p.