

Строительные Материалы[®] № 12

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)

ISSN 2658-6991 (Online)



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU ДЕКАБРЬ 2021 г. (798)

НАУКА – КЕРАМИЧЕСКОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

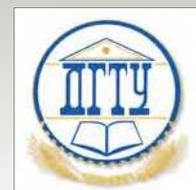


ИСФ ДГТУ —
профессиональные кадры
для керамической отрасли России



WWW.SIBSTRIN.RU

**НГАСУ (СИБСТРИН) и ДГТУ —
образование, наука, практика, производство!**



WWW.DONSTU.RU

SOLID IDEAS

Bongioanni Macchine интегрирует концепцию «умной фабрики», внедряя технологии ИНДУСТРИИ 4.0 в производственные и энергетические системы своего оборудования



BONGIOANNI
HEAVY CLAY TECHNOLOGY

 www.bongioannimacchine.com 

Учредитель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»,
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,
д. 9, корп. 1, кв. 1
Издатель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,
д. 9, корп. 1, кв. 1
Свид. о регистрации ПИ № 77–1989
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)
Входит в Перечень ВАК, РИНЦ,
Russian Science Citation Index
на платформе Web of Science
Адрес редакции: Россия, 127434, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 9, стр. 3

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 12

Основан в 1955 г.

(798) Декабрь 2021 г.

Тел.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Керамические строительные материалы

Г.И. СТОРОЖЕНКО, Т.Е. ШОЕВА

Технология жесткого формования керамического кирпича на основе суглинков Западной Сибири. 4

Д.В. АКСТ, А.Ю. СТОЛБОВУШКИН, О.А. ФОМИНА

Стеновые керамические материалы объемного окрашивания с матричной структурой. 9

В.Д. КОТЛЯР, Ю.В. ТЕРЁХИНА, А.В. КОТЛЯР, Р.А. ЯЩЕНКО, Н.Е. ДЬЯЧЕНКО

Глины Касьминского проявления в Кемеровской области — перспективное сырье для производства клинкерного кирпича. 17

Х.С. ЯВРУЯН, А.В. КОТЛЯР, Е.С. ГАЙШУН, А.С. ГАЙШУН

Общая характеристика террикоников Восточного Донбасса и продуктов их переработки как сырья для производства изделий стеновой керамики. 23

В.А. ГУРЬЕВА, А.В. ДОРОШИН, А.А. ИЛЬБИНА

Модифицированные золошлаковые отходы в производстве керамического кирпича полусухого прессования. 28

Инновационные отечественные разработки

И.Н. ТИХОНОВ, И.В. КОПЫЛОВ

Эффективность производства и применения арматурного проката с новыми видами периодического профиля. 35

Современные бетоны

В.В. НЕЛЮБОВА, С.А. УСИКОВ, В.В. СТРОКОВА, Д.Д. НЕЦВЕТ

Состав и свойства самоуплотняющегося бетона с использованием комплекса модификаторов. 48

А.В. КУРШПЕЛЬ, В.Х. КУРШПЕЛЬ

О механизме разрушения защитного слоя бетона от коррозии арматуры. 55

К.Б. ШАРАФУТДИНОВ, К.А. САРАЙКИНА, Г.Г. КАШЕВАРОВА, В.Т. ЕРОФЕЕВ

Изучение эффективности суперабсорбирующей полимерной добавки для уменьшения аутогенной усадки бетона без снижения его прочности. 61

Результаты научных исследований

С.А. КНЯЗЕВА, Г.И. ЯКОВЛЕВ, А.И. ХАРЧЕНКО

Геополимерная композиция на основе керамзитовой пыли для геотехнического строительства. 69

Указатель статей, опубликованных в журнале «Строительные материалы»® в 2021 г., см. на сайте https://journal-cm.ru/images/files/2021/Ukazatel_SM_2021.pdf



Founder of the journal: «STROYMATERIALY»
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,
Moscow, 125319, Russian Federation
Publisher: «STROYMATERIALY»
Advertising-Publishing Firm, OOO
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,
Moscow, 125319, Russian Federation
Registration certificate PI № 77–1989
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)
Included in the list of journals of the Higher
Attestation Commission (Russia), Russian Science
Citation Index on the platform Web of Science
Editorial address: 9/3 Dmitrovskoye Highway,
127434, Moscow, Russian Federation

Monthly scientific-technical and industrial journal

STROITEL'NYE MATERIALY®

№ 12

Founded in 1955 (798) December 2021

Tel.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Ceramic building materials

G.I. STOROZHENKO, T.E. SHOEVA

Technology for the Rigid Moulding of Ceramic Bricks Based on Western Siberia Loams. 4

D.V. AKST, A. Yu. STOLBOUSHKIN, O.A. FOMINA

Wall Ceramic Materials of Volume Coloring With Matrix Structure. 9

V.D. KOTLYAR, Yu.V. TEREKHINA, A.V. KOTLYAR, R.A. YASHENKO, N.E. DYACHENKO

**Clays of The Kasminsky Manifestation in The Kemerovo Region – Promising Raw Materials
for Production Clinker Bricks 17**

Kh.S. YAVRUYAN, A.V. KOTLYAR, E.S. GAISHUN, A.S. GAISHUN

**General Characteristics of the Refuse Heaps of Eastern Donbass and Products of their Processing
as Raw Materials for the Production of Wall Ceramics 23**

V.A. GUR'EVA, A.V. DOROSHIN, A.A. IL'INA

Modified Ash and Slag Waste in the Production of Semi-Dry Pressed Ceramic Bricks 28

Innovative domestic developments

I.N. TIKHONOV, I.V. KOPYLOV

Efficiency of Production and Application of Rebar Rolled Products with New Types of Periodic Profile 35

Modern concretes

V.V. NELYUBOVA, S.A. USIKOV, V.V. STROKOVA, D.D. NETSVET

Composition and Properties of Self-Compacting Concrete Using a Complex of Modifiers. 48

A.V. KURSHPEL, V. Kh. KURSHPEL

About the Mechanism of Destruction of the Protective Layer of Concrete Due to Reinforcement Corrosion 55

K.B. SHARAFUTDINOV, K.A. SARAİKINA, G.G. KASHEVAROVA, V.T. EROFEEV

**Study of the Superabsorbent Polymer Additive Effectiveness to Reduce the Autogenous Shrinkage
of Concrete without Reducing its Strength 61**

Results of scientific research

S.A. KNYAZEVA, G.I. YAKOVLEV, I.Ya. HARCHENKO

Geopolymer Composition on the Basis of Expanded Clay Dust For Geotechnical Construction. 69

Главный редактор:

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

Председатель редакционного совета:

РЕСИН В.И.,
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)

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 (Санкт-Петербург)

КОТЛЯР В.Д.,
д-р техн. наук, профессор (Ростов-на-Дону)

КРИВЕНКО П.В.,
д-р техн. наук, профессор (Украина)

ЛЕОНОВИЧ 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)

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)

Editor-in-chief

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

Chairman of Editorial Board

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

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

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

BURYANOV A.,
Doctor of Science (Engineering), Director of the Russian Association
of gypsum (Moscow)

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
(Saratov)

KOROLEV E.,
Doctor of Science (Engineering), Professor (St. Petersburg)

KOTLYAR V.,
Doctor of Science (Engineering), Professor (Rostov-on-Don)

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 (Grozniy)

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)

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)

Г.И. СТОРОЖЕНКО^{1,2}, д-р техн. наук (storojenko_gi@mail.ru),

Т.Е. ШОЕВА¹, канд. техн. наук

¹ Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
(630008, Новосибирск-8, ул. Ленинградская, 113)

² Сибирский государственный индустриальный университет (654042, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Технология жесткого формования керамического кирпича на основе суглинков Западной Сибири

Показана возможность использования сибирских пылеватых суглинков в технологии жесткого формования керамического кирпича. Изменение реологических характеристик сырья под требования данной технологии возможно осуществить за счет изменения коллоидно-химических свойств поровой составляющей шихты путем введения активированного шликера, содержащего ультрадисперсные глинистые частицы. Такая добавка в количестве 10% в суглинок Верх-Тулинского месторождения привела к увеличению пластичности на 60%, что дало возможность формовать изделия из шихты влажностью 16% на лабораторном экструдере при номинальной нагрузке на двигателе.

Ключевые слова: сибирские пылеватые суглинки; жесткое формование, шликер; диспергирование глинистых частиц в жидкой среде.

Для цитирования: Стороженко Г.И., Шоева Т.Е. Технология жесткого формования керамического кирпича на основе суглинков Западной Сибири // *Строительные материалы*. 2021. № 12. С. 4–8. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-4-8>

G.I. STOROZHENKO^{1,2}, Doctor of Sciences (Engineering) (storojenko_gi@mail.ru), T.E. SHOEVA¹, Candidate of Sciences (Engineering)

¹ Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (113, Leningradskaya Street, Novosibirsk-8, 630008, Russian Federation)

² The Siberian State Industrial University (42, Kirov Street, Kemerovo Region, Novokuznetsk, 654007, Russian Federation)

Technology for the Rigid Moulding of Ceramic Bricks Based on Western Siberia Loams

The possibility of using Siberian dusty loams in the technology of rigid formation of ceramic bricks is shown. Changing the rheological characteristics of raw materials to meet the requirements of this technology can be achieved by changing the colloid-chemical properties of the pore component of the charge by introducing an activated slurry containing ultra-dispersed clay particles. Such an addition of 10% to the clay loam of the Verkh-Tulinsky deposit resulted in an increase in plasticity by 60%, which made it possible to mould products from a charge with a moisture content of 16% on a laboratory extruder at nominal load on the motor.

Keywords: Siberian dusty loams; rigid moulding, slip, dispersion of clay particles in liquid medium.

For citation: Storozhenko G.I., Shoeva T.E. Technology for the rigid moulding of ceramic bricks based on Western Siberia loams. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 12, pp. 4–8. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-4-8>

Ситуация в промышленности стеновых керамических материалов в Сибирском федеральном округе (СФО) в связи с отсутствием запасов качественных глин выглядит тревожно. Особую озабоченность в связи с дефицитом сырья испытывают импортные заводы мощностью 60 и более млн шт. усл. кирпича/г. Сырьевой базой отечественных кирпичных заводов, ранее выпускавших рядовой керамический кирпич, служили пылеватые суглинки, запасы которых и до настоящего времени являются практически неисчерпаемыми, а низкое качество продукции связывали еще и с несовершенством отечественного оборудования. Но в настоящее время с такими же проблемами сталкиваются и на заводах с европейскими технологическими линиями.

Выход из этой ситуации, учитывая насущную потребность развивать в Сибири строительство городов-миллионников, видится в совершенствовании технологии полусухого прессования и в освоении технологии жесткого формования, широко применяемой в Канаде, США и Австралии [1–4].

Технологические и экономические преимущества жесткого формования подробно описаны в [1].

Высокая плотность вакуумированной массы, пониженная формовочная влажность (12–17%), снижение чувствительности к сушке сырца и высокая морозостойкость готовых изделий — все это делает технологию более экономичной в сравнении с пластическим формованием [3].

Внедрению на кирпичных заводах СФО жесткого формования мешает не только отсутствие аппаратного ее обеспечения, но и дефицит качественных глин, поскольку высокая пластичность сырья является одним из главных факторов, определяющих его пригодность для данной технологии.

Изменение реологических характеристик суглинков до требований технологии жесткого формования можно осуществить за счет изменения коллоидно-химических свойств поровой составляющей шихты путем введения активированного шликера, содержащего диспергированные глинистые частицы. Для этого существуют как теоретические, так и практические предпосылки.

Диспергирование глинистых частиц и их механоактивацию проводили в жидкостном смесителе роторного типа «Сирена», в котором сырье одновре-

менно подвергается механическому, акустическому и гидродинамическому воздействию и является эффективным способом разрушения природной структуры глинистых минералов [5].

На основании имеющихся данных можно назвать последствия механической активации (МА) слоистых гидроалюмосиликатов:

- разупорядочение кристаллической структуры, разрыв связей Al–ОН и аморфизация зерен минералов [6, 7];

- образование активных центров на изломах кристаллической решетки [8];

- накопление дефектов структуры в объеме вещества [9];

- изменение последовательности и природы фазовых превращений в процессе термолиза активированных продуктов при их нагревании до температуры обжига [9].

Кроме указанных последствий при МА в жидкой среде происходит диспергация не только глинистых, но и других породообразующих минералов, находящихся в сырье в пылеватом состоянии (размером менее 0,5 мм). В результате увеличения удельной поверхности дисперсной фазы количество физически связанной ею воды в шликере возрастает, что и обуславливает улучшение реологических свойств шихты, поскольку лучшими формовочными свойствами обладают массы с максимально развитыми слоями физически связанной воды при минимальном содержании свободной. Поэтому добавка активированного шликера в глинистое сырье способствует формированию поверхности контактов между частицами на стадии формования сырцовых изделий.

Основные физико-химические процессы формирования контактов между частицами в керамических материалах происходят на стадии спекания. Их интенсивность определяется в основном величиной поверхности контактов и подвижностью ионов на

поверхности и в объеме твердых тел. Реакционная способность возрастает с ростом дефектности и дисперсности взаимодействующих частиц, что приводит к изменению констант равновесия химических реакций:

$$\ln K_d - \ln K = \frac{\Delta G_d^0}{RT},$$

где ΔG_d^0 – приращение химического сродства, обусловленное дисперсностью или дефектностью; K_d и K – константы равновесия реакции с участием диспергированных и недиспергированных веществ.

По этим причинам, например, с увеличением дисперсности ослабляется связь кристаллизационной воды с веществом, а для тугоплавких веществ наблюдается сильный эффект понижения температуры плавления [10, 11].

Разупорядочение приповерхностных слоев минералов в результате активации приводит к повышению их реакционной способности, при этом изменение температуры фазового перехода на величину $\Delta T = T - T_d$ определяется соотношением:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\sigma V_M}{H_{ф.п}} \frac{dS}{dV},$$

где T и T_d – температуры фазового перехода для недиспергированного и диспергированного вещества соответственно; σ – поверхностное натяжение; V_M – мольный объем вещества; $H_{ф.п}$ – энтальпия фазового перехода; S – поверхность; V – объем частицы вещества (производная dS/dV определяется формой частиц вещества).

В целом при спекании высокодисперсных частиц следует ожидать изменения температурных диапазонов протекания тех или иных физико-химических процессов, в частности интенсификации твердофазных процессов: разложение карбонатов, оксалатов или кристаллогидратов, образование солей и др. [12].

Таблица 1
Table 1

Химический состав глинистого сырья
The chemical composition of clay raw materials

Месторождение глинистого сырья	Содержание оксидов в мас. %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	P ₂ O ₅	ППП
Мусохрановское	61,61	18,42	0,86	4,88	2,12	1,53	3,86	0,17	6,44
Верх-Тулинское	62,75	13,2	0,75	6,22	3,98	2,11	3,77	0,11	7,11

Таблица 2
Table 2

Результаты испытаний активированных шихт и образцов на их основе
Test results of activated charges and samples based on them

Составы шихт	Пластичность	Содержание глинистых частиц, %	ρ , г/см ³	$R_{сж}$, МПа	Водопоглощение, %
Контрольный	8,2	16,46	1,834	19,1	13,5
Состав 1	11,5	17,03	1,848	21,7	13,9
Состав 2	13,5	20,43	1,823	25,4	13,6

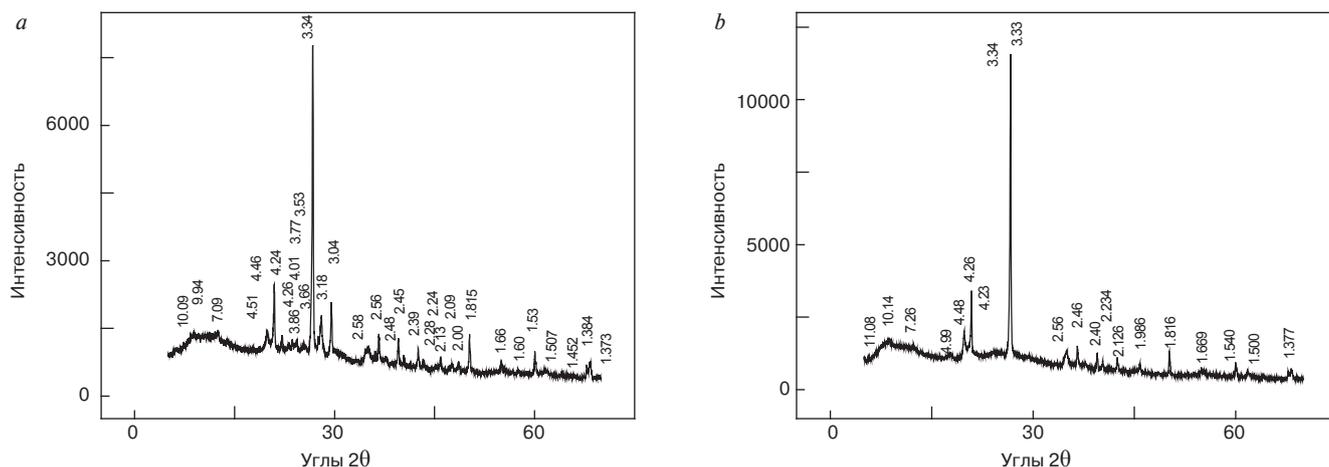


Рис. 1. Дифрактограммы глинистого сырья: *a* – Верх-Туллинского; *b* – Мусохрановского месторождений
 Fig. 1. Diffraction patterns of clay raw materials: *a* – Verkh-Tulinsky; *b* – Musokhranovskoye fields

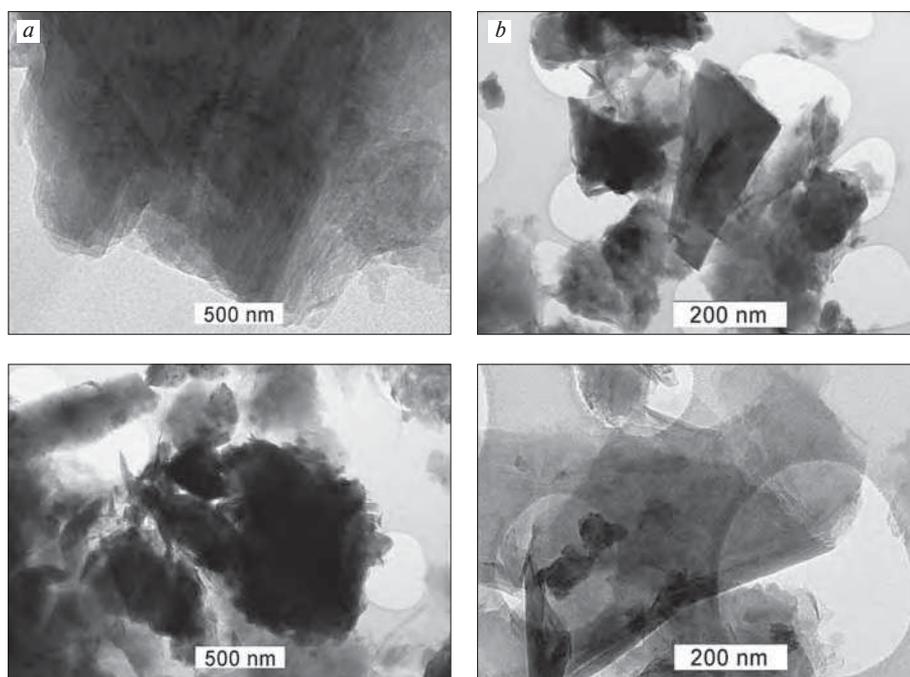


Рис. 2. Дисперсность частиц в исходном (*a*) и активированном (*b*) шликере
 Fig. 2. Dispersion of particles in the initial (*a*) and activated (*b*) slip

Был заводской опыт использования на кирпичных заводах объединения «Новосибирскагропромстройдеталь» активированного шликера в советское время [13]. Результаты показали, что введение в шихту вместо воды затворения шликера влажностью 70–75%, прошедшего активацию в установке «Сирена», улучшает реологические характеристики массы, снижает чувствительность сырца к сушке, повышает марку кирпича по прочности и морозостойкости [13].

Целью настоящих исследований была разработка способа получения на основе сибирских пылеватых суглинков керамической шихты, пригодной для жесткого формования керамических изделий.

В работе использовались два вида глинистого сырья, характерного для месторождений кирпичных глин Западной Сибири.

Глинистое сырье Верх-Туллинского месторождения (Новосибирская обл.) относится к типу пылеватых суглинков; имеет рыхлую беспорядочную структуру; слабозапасоченное; содержание крупнозернистых включений низкое (1,8–3,1%); бурно вскипает при взаимодействии с 10%-м раствором HCl. Суглинки относятся к группе умереннопластичного (8–11) сырья, среднечувствительного к сушке (100–105 с по Чижскому А.Ф.); воздушная усадка в среднем 6,5%.

Глинистое сырье Мусохрановского месторождения также слабозапасоченное, с низким содержанием крупнозернистых включений (0,8–1,1%), не вскипает при взаимодействии с раствором HCl. Глина среднепластичная (14–16), с

содержанием глинистых частиц 35–37%, содержание песчаных – от низкого до среднего (12–22%), среднечувствительная к сушке (80–85 с по Чижскому А.Ф.); воздушная усадка в среднем 7,5%.

По химическому составу (табл. 1) глинистое сырье относится к группам полукислого и кислого сырья со средним и высоким содержанием красящих оксидов, с высоким содержанием свободного кварца, а также повышенным содержанием CaO (до 3,98%) в суглинках Верх-Туллинского месторождения.

По минеральному составу суглинки относятся к группе каолинит-гидроалюминатного сырья с примесью кварца, полевых шпатов, амфиболов и железосодержащих минералов (рис. 1).

В работе проводилось обогащение суглинка Верх-Туллинского месторождения шликером на основе

глинистой и пылевой фракций мусохрановского суглинка. Активация сырья с целью получения ультрадисперсных частиц проводилась с помощью роторного аппарата модуляции потоков в жидкой среде за счет гидродинамического, акустического и кавитационного разрушения природных агрегатов глинистой и пылевой фракций. При такой обработке происходило повышение удельной поверхности дисперсной фазы, о чем свидетельствуют результаты электронной микроскопии (рис. 2).

Исходное сырье измельчалось до полного прохождения через сито № 1, контрольный состав увлажнялся до формовочной влажности для жесткого формования ($16 \pm 5\%$), опытные составы с добавками шликера: состав 1–5% и состав 2–10% (в пересчете на содержание активированных частиц) также увлажнялись до $W_{\text{форм}} = 16 \pm 5\%$.

На лабораторном экструдере формовались образцы-цилиндры диаметром 65 мм и высотой 65 ± 10 мм, которые высушивались и обжигались при температуре 950°C . Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Эксперименты по получению шихт на основе пылеватых суглинков, пригодных для жесткого формования, показали, что использование в качестве добавки водного раствора с ультрадисперсными глинистыми и пылевыми частицами может обеспечить достижение поставленной цели.

Список литературы

1. Хавкин А.Я., Берман Р.З. Кирпичные заводы малой мощности с применением технологии жесткой экструзии // *Строительные материалы*. 2000. № 4. С. 18–19.
2. Тарасевич Б.П. Оптимальные варианты производства кирпича (моделирование схемы жесткого формования) // *Строительные материалы*. 1994. № 6. С. 8–10.
3. Берман Р.З. Использование жесткого формования — метод реконструкции кирпичных заводов // *Строительные материалы*. 1995. № 5. С. 25–27.
4. Стороженко Г.И., Шоева Т.Е., Пшенникова В.В. Исследование сырьевых материалов Западной Сибири для производства керамических облицовочных материалов // *Строительные материалы*. 2021. № 9. С. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-23-27>
5. Стороженко Г.И., Сыромясов В.А., Иванов А.И. Керамические стеновые материалы на основе активированных дисперсных систем // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2020. № 5 (737). С. 86–93.
6. Isupov T.S., Lapuchova E.S., Korneva T.A. Baniche Listy. Memorialnecislo. Kosice. 1976, pp. 30–37.
7. Щербак М.Я. и др. Изучение механически активированных слоистых силикатов методом ЭПР // *Доклады АН СССР*. 1978. Т. 240. № 3. С. 714–717.

При добавке шликера с ультрадисперсными глинистыми частицами в суглинок Верх-Тулинского месторождения пластичность последнего возрастает на 60%, содержание глинистых частиц — на 24%, прирост прочности обожженных образцов составляет 33%, шихта влажностью 16% формуется на лабораторном экструдере при номинальной нагрузке на двигатель.

Полученные результаты показали возможность улучшения реологии пылеватых суглинков, но окончательные выводы о целесообразности перехода на жесткое формование могут быть сделаны на основе решения технологических вопросов: эффективность и надежность жидкостных диспергаторов; оптимальная влажность шликера, при которой обеспечивается равномерное распределение ультрадисперсных частиц в шихте. Дополнительные вопросы касаются исследований структурно-механических характеристик активированных масс, поведения сырьевых изделий при сушке и т. д. Однако в случае решения всех вопросов по эффективному использованию сибирских пылеватых суглинков можно получить, во-первых, обширную сырьевую базу для кирпичного производства; во-вторых, возможность создания отечественных технологических автоматизированных комплексов для жесткого формования.

References

1. Khavkin A.Ya., Berman R.Z. Low-capacity brick factories using rigid extrusion technology. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2000. No. 4, pp. 18–19. (In Russian).
2. Tarasevich B.P. Optimal options for brick production (modeling of a rigid molding scheme). *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 1994. No. 6, pp. 8–10. (In Russian).
3. Berman R.Z. The use of rigid molding — a method of reconstruction of brick factories. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 1995. No. 5, pp. 25–27. (In Russian).
4. Storozhenko G.I., Shoeva T.E., Pshennikova V.V. Research of raw materials of Western Siberia for the production of ceramic facing materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 9, pp. 23–27. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-23-27>
5. Storozhenko G.I., Syromyasov V.A., Ivanov A.I. Ceramic wall materials based on activated dispersed systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavodeniya. Stroitel'stvo*. 2020. No. 5 (737), pp. 86–93. (In Russian).
6. Isupov T.S., Lapuchova E.S., Korneva T.A. Baniche Listy. Memorialnecislo. Kosice. 1976, pp. 30–37.
7. Shcherbakova M.Ya. et al. Study of mechanically activated layered silicates by the EPR method. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1978. Vol. 240. No. 3, pp. 714–717. (In Russian).

8. Лобанов Б.В., Минченко В.В., Кузьмович В.В. Управление физико-химическими и технологическими свойствами глин. В кн.: Глинистые минералы и породы и их использование в народном хозяйстве. Тез. докладов. Новосибирск, 1988. 155 с.
9. Колобердин В.И и др. Исследование влияния механической активации сырья на скорость его обжига. В кн.: Механохимия неорганических веществ. Тез. докладов Всесоюзного совещания. Новосибирск: СО АН СССР, 1982. С. 88–90.
10. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии: поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия, 1988. С. 111–118.
11. Abdelaoui M., Gaffet E. The physics of mechanical alloying in a planetary ball mill // *Acta Metallurgica et Materialia*. 1995. Vol. 43. Iss. 3, pp. 1087–1098. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(95\)92625-7](https://doi.org/10.1016/0956-7151(95)92625-7)
12. Saito F. Mechanochemistry and processing of inorganic materials. *Shigen-to-Sozai*. 1995. Vol. 111. Iss. 8, pp. 515–522. <https://doi.org/10.2473/shigentoso-zai.111.515>
13. Шарипов Р.Я., Стороженко Г.И. Заводской опыт внедрения новых технологий для улучшения качества керамического кирпича // *Строительные материалы*. 2005. № 6. С. 11–14.
8. Lobanov B.V., Minchenko V.V., Kuzmovich V.V. Management of physical, chemical and technological properties of clays. In the book. Clay minerals and rocks, and their use in the national economy. Abstracts of Reports. Novosibirsk. 1988. 155 p. (In Russian).
9. Koloberdin VI et al. Investigation of the effect of mechanical activation of raw materials on the rate of its firing. In the book: Mechanochemistry of inorganic substances. Abstracts Reports of the All-Union meeting. Novosibirsk: SB AS USSR. 1982, pp. 88–90. (In Russian).
10. Frolov Yu.G. Kurs kolloidnoy khimii: poverkhnostnyye yavleniya i dispersnyye sistemy [Colloid chemistry course: surface phenomena and dispersed systems]. Moscow: Chemistry. 1988, pp. 111–118.
11. Abdelaoui M., Gaffet E. The physics of mechanical alloying in a planetary ball mill. *Acta Metallurgica et Materialia*. 1995. Vol. 43. Iss. 3, pp. 1087–1098. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(95\)92625-7](https://doi.org/10.1016/0956-7151(95)92625-7)
12. Saito F. Mechanochemistry and processing of inorganic materials. *Shigen-to-Sozai*. 1995. Vol. 111. Iss. 8, pp. 515–522. <https://doi.org/10.2473/shigentoso-zai.111.515>
13. Sharipov R.Ya., Storozhenko G.I. Factory experience of introducing new technologies to improve the quality of ceramic bricks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. No. 6, pp. 11–14. (In Russian).



НАЦИОНАЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ
производителей автоклавного газобетона

VI международная научно-практическая конференция «Современный автоклавный газобетон»

8–10 февраля 2022 г.

г. Москва

Конференция проводится в двух форматах: в очном (г. Москва, отель «Салют») и заочном (онлайн и в записи)

ТЕМАТИКА:

- Техническое регулирование в ПСМ и строительстве
- Производство и потребление газобетона. Статистика и перспективы
- Однослойные легкие штукатурки для газобетона – причины малой востребованности
- Кладка на пенополиуретановых швах. Резюме по опыту 10 лет использования

ДОКЛАДЫ:

Конструкции с применением ГБ. Тренды последних лет
Однослойные стены из газобетона D400 для зданий класса энергопотребления A⁺
Пятиэтажные здания с однослойными несущими стенами из ГБ – 2021

Более подробная информация – на сайте <https://www.gazo-beton.org/conference>

Ассоциация производителей автоклавного газобетона
naag@gazo-beton.org
тел. +7 925 643 88 82

УДК 666.7-12

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-9-16>

Д.В. АКСТ¹, инженер (daniel_axt@mail.ru), А.Ю. СТОЛБОУШКИН¹, д-р техн. наук (stanyr@list.ru);
О.А. ФОМИНА², канд. техн. наук (soa2@mail.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., 4)

Стеновые керамические материалы объемного окрашивания с матричной структурой

Разработаны научные принципы создания стеновых керамических материалов объемного окрашивания с матричной структурой. Обоснована необходимость структурной концентрации красящих добавок из техногенных отходов с пониженным содержанием соединений-хромофоров для получения стеновой керамики объемного окрашивания с требуемыми свойствами. Предложены модель формирования пространственно-организованной структуры и схема распределения сырьевых компонентов при обжиге керамического матричного композита. Установлено, что концентрация красящего компонента в количестве 5–10 мас. % от состава шихты в матрице композиционного материала путем агрегирования базового компонента шихты в гранулы диаметром 1–3 мм, нанесения на них оболочки толщиной 0,05–0,2 мм из красящего компонента с последующими прессованием, сушкой и обжигом обеспечивает объемное окрашивание стеновой керамики при снижении содержания хромофоров в красящем компоненте до 33%. Приведены исследования макро- и микроструктуры полученных керамических материалов. Показано, что керамический матричный композит на макроуровне состоит из ядер, сформированных из базового компонента шихты и покрытых оболочкой из продуктов спекания красящей добавки темного цвета, а в граничной зоне между ними формируется переходный слой, образованный в результате взаимодействия компонентов ядра и оболочки с их характерной диффузией в процессе тепломассопереноса при обжиге. Представлены результаты комплексного исследования фазового состава полученных керамических матричных композитов. Сформулированы научные принципы создания стеновых керамических материалов объемного окрашивания с матричной структурой. Определены основные технико-экономические показатели разработанной технологии новых керамических материалов.

Ключевые слова: стеновая керамика, объемное окрашивание, матричная структура, концентрация красящих добавок, соединения-хромофоров.

Для цитирования: Акст Д.В., Столбоушкин А.Ю., Фомина О.А. Стеновые керамические материалы объемного окрашивания с матричной структурой // *Строительные материалы*. 2021. № 12. С. 9–16. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-9-16>

D.V. AKST¹, Engineer (daniel_axt@mail.ru), A. Yu. STOLBOUSHKIN¹, Doctor of Sciences (Engineering) (stanyr@list.ru);

O.A. FOMINA², Candidate of Sciences (Engineering) (soa2@mail.ru)

¹ Siberian State Industrial University (42, Kirova Street, Novokuznetsk, 654007, Russian Federation)

² Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, (4, Maly Kharitonievsky side Street, Moscow, 101990, Russian Federation)

Wall Ceramic Materials of Volume Coloring With Matrix Structure

The scientific principles of creating wall ceramic materials of volumetric coloring with a matrix structure have been developed. It has been substantiated the necessity of the structural concentration of coloring additives from industrial waste with a reduced content of chromophore compounds for the production of bulk colored wall ceramics with the required properties. It was proposed a model for the formation of a spatially organized structure and a distribution scheme for raw components during firing of a ceramic matrix composite. It was found that the concentration of the coloring component in the amount of 5–10 wt.% of the composition of the charge in the matrix of the composite material by aggregating the basic component of the charge into granules with a diameter of 1–3 mm, applying a shell 0.05–0.2 mm thick from the coloring component with subsequent pressing, drying and firing, provides volumetric coloring of wall ceramics while reducing the content of chromophores in the coloring component to 33%. Investigations of the macro- and microstructure of the obtained ceramic materials are presented. It is shown that the ceramic matrix composite at the macrolevel consists of cores formed from the basic component of the charge and covered with a shell of sintering products of a dark-colored dye additive, and a transition layer is formed in the boundary zone between them, formed as a result of the interaction of the core and shell components with their characteristic diffusion. in the process of heat and mass transfer during firing. In the current paper there are presented the results of a comprehensive study of the phase composition of the obtained ceramic matrix composites. The scientific principles of creating wall ceramic materials of volumetric coloring with a matrix structure are formulated. The main technical and economic indicators of the developed technology of new ceramic materials have been determined.

Keywords: wall ceramics, volumetric coloring, matrix structure, concentration of coloring additives, chromophore compounds.

For citation: Akst D.V., Stolboushkin A.Yu., Fomina O.A. Experimental-industrial tests of wall ceramics technology of volume staining with a matrix structure. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 12, pp. 9–16. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-9-16>

Постоянно растущие требования, предъявляемые к современным строительным материалам в части надежности, долговечности и эстетичности, приводят к увеличению производства керамических стеновых материалов, среди которых наибольшей популярностью пользуется декоративный керамический кирпич [1]. Информация, связанная с его изготовлением

и эксплуатацией, регулярно освещается в отечественной и зарубежной литературе. В процессе многолетних исследований сформированы научно-технологические принципы объемного окрашивания и осветления кирпича [2–4], получения керамических изделий с модифицированной поверхностью [5, 6]; изучено влияние параметров и режимов обжига на спекание и

цвет стеновой керамики [7, 8]; разработаны научные основы и положения создания строительных керамических материалов из техногенного и нетрадиционного сырья с новыми декоративными и физико-механическими характеристиками [9–16]. В работах Г.Н. Масленниковой, М. Троян и др. исследованы физико-химические основы синтеза неорганических пигментов и их использование в керамической промышленности [17–20].

Тем не менее известные на сегодняшний день способы получения облицовочной керамики обладают рядом недостатков. Способы обработки поверхности керамического кирпича характеризуются усложнением технологии, наличием дополнительного оборудования и возможным снижением эксплуатационной стойкости изделий [21]. В свою очередь, при использовании объемного окрашивания возникают проблемы с получением выразительной окраски кирпича, при этом в технологии применяются в основном дорогие и дефицитные пигменты [22].

Одним из перспективных направлений развития отрасли стеновых керамических материалов является замена рафинированных пигментов на альтернативные нетрадиционные сырьевые материалы – техногенные продукты, содержащие не менее 30–40% оксидов металлов-хромофоров [23]. Однако с учетом накопленных запасов минеральных промышленных отходов на сегодняшний день нет систематизированных данных об их использовании в производстве стеновой керамики объемного окрашивания. Тем не менее исследования по разработке новых структур, составов и технологий стеновых керамических материалов объемного окрашивания с использованием техногенных продуктов являются актуальными.

По мнению авторов, направленное регулирование и формирование оптимальных структур керамического материала дает возможность использования сырьевых компонентов с пониженным содержанием хромофоров. Частными исследованиями в области проектирования и создания пространственно-организованных структур занимался ряд отечественных и зарубежных ученых [24], однако научные принципы объемного окрашивания стеновой керамики с матричной структурой из композиции природного и техногенного сырья до настоящего времени так и не были сформированы.

Цель настоящей работы заключалась в разработке научных принципов создания стеновых керамических материалов объемного окрашивания с матричной структурой. Для ее достижения были поставлены и решены следующие задачи исследований:

- обоснование выбора, исследование вещественного состава и технологических характеристик сырьевых материалов;
- разработка модели формирования пространственно-организованной структуры и схемы распределения красящих компонентов с пониженным содержанием хромофоров при обжиге керамического кирпича;

- исследование процессов образования фаз, формирования структуры и распределения хромофоров в ядре и оболочке, составляющей матрицу керамического композиционного материала;

- определение оптимальных составов и основных технологических параметров получения стеновых керамических материалов на основе природного и техногенного сырья с требуемыми декоративными и прочностными свойствами;

- комплексные исследования фазового состава и структуры стеновой керамики на основе полиминеральных, умеренно- и среднепластичных глин, а также железо-, марганец- и ванадийсодержащих техногенных продуктов;

- проведение опытно-промышленной апробации разработанных технологий получения объемно-окрашенного керамического кирпича с матричной структурой на основе природного сырья и техногенных отходов.

Научная гипотеза исследований

На основании проведенных исследований и анализа литературных данных сформулирована научная гипотеза о необходимости структурной концентрации красящих добавок из техногенных отходов с пониженным содержанием соединений-хромофоров для получения стеновой керамики объемного окрашивания с требуемыми свойствами.

Объекты исследований

В соответствии с разработанной гипотезой исследований для изготовления стеновой керамики объемного окрашивания с матричной структурой было проведено дифференцирование используемого природного и техногенного сырья на базовый и окрашивающий компоненты.

В качестве базового компонента шихты (для формирования агрегированных зерен) были выбраны природное сырье – глина Ленинск-Кузнецкого месторождения и техногенное сырье – шламистые отходы обогащения железных руд ОАО «Абагурская обогатительно-агломерационная фабрика» (Кемеровская обл. – Кузбасс).

В качестве окрашивающего компонента шихты (для формирования окрашенной оболочки вокруг ядер) было выбрано техногенное сырье, содержащее соединения-хромофоры. Использовались отходы добычи марганцевых руд ООО «Запсибруда», шлак от выплавки и пыль газоочистки от производства ферросиликомарганца ООО «Западно-Сибирский электрометаллургический завод» (Кемеровская обл. – Кузбасс). Для базового компонента шихты на основе железорудных отходов применялся шлак от выплавки феррованадия АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» (Свердловская обл.). Результаты комплексного исследования вещественного состава и свойств сырьевых материалов приведены в работе [25].

Модель формирования керамики

Модель формирования керамики объемного окрашивания с матричной структурой представлена на рис. 1. Согласно разработанной модели, пространственная организация структуры керамического композиционного материала позволит сконцентрировать красящий компонент в матрице без распределения в общей массе и обеспечить объемную окраску керамики при пониженном содержании в нем соединений-хромофоров.

Результаты и обсуждение

Реализация модели формирования стеновой керамики (рис. 1) проводилась по принципу агломерации базового сырья в гранулы сферической формы преимущественного диаметра $D_{гр}=1-3$ мм и последующего нанесения на их поверхность окрашивающей оболочки толщиной $\delta_1=50-200$ мкм из красящих техногенных отходов.

Экспериментальная проверка модели в лабораторных условиях выполнялась на примере глинистого сырья с добавкой марганцевой пыли газоочистки. Из двухкомпонентной шихты, приготовленной по запатентованному способу [26], компрессионным формованием были изготовлены керамические образцы.

Исследования структуры по шлифам и аншлифам стеновой керамики (рис. 2) показали, что керамический матричный композит на макроуровне состоит из ядер кирпично-красного цвета, покрытых оболочкой из продуктов спекания марганецсодержащей добавки коричневого цвета. В граничной зоне между ними наблюдается переходный слой, образованный в результате взаимодействия компонентов ядра и оболочки с их характерной диффузией в процессе теплообмена при обжиге (рис. 2, с).

СЭМ-исследования образцов (рис. 3, спектры 1, 2) показали различия в микроструктуре ядра и оболочки вокруг него (матрицы). Ядра имеют равномерную, частично аморфизованную микротекстуру; в матрице, напротив, наблюдаются крупные (20–50 мкм) агрегированные напластования неправильной формы. В граничном слое можно отметить участки из затвердевшего расплава, что свидетельствует о протекании процессов жидкофазного спекания материала с образованием новых минеральных фаз, концентрация которых в матрице после обжига обеспечивает темно-коричневую окраску керамического композита.

По результатам энергодисперсионного микроанализа установлены различия элементного состава в исследуемых точках поверхности композиционного материала, свидетельствующие о химических неоднородностях ядра и матрицы.

При изучении энергетического спектра 3 (рис. 3) можно отметить наличие химических элементов, относящихся как к дисперсионной среде (матрице), так и к дисперсной фазе (ядру) композита, что подтверждает формирование переходной зоны на границе раздела, состоящей из фаз и ядра, и обо-

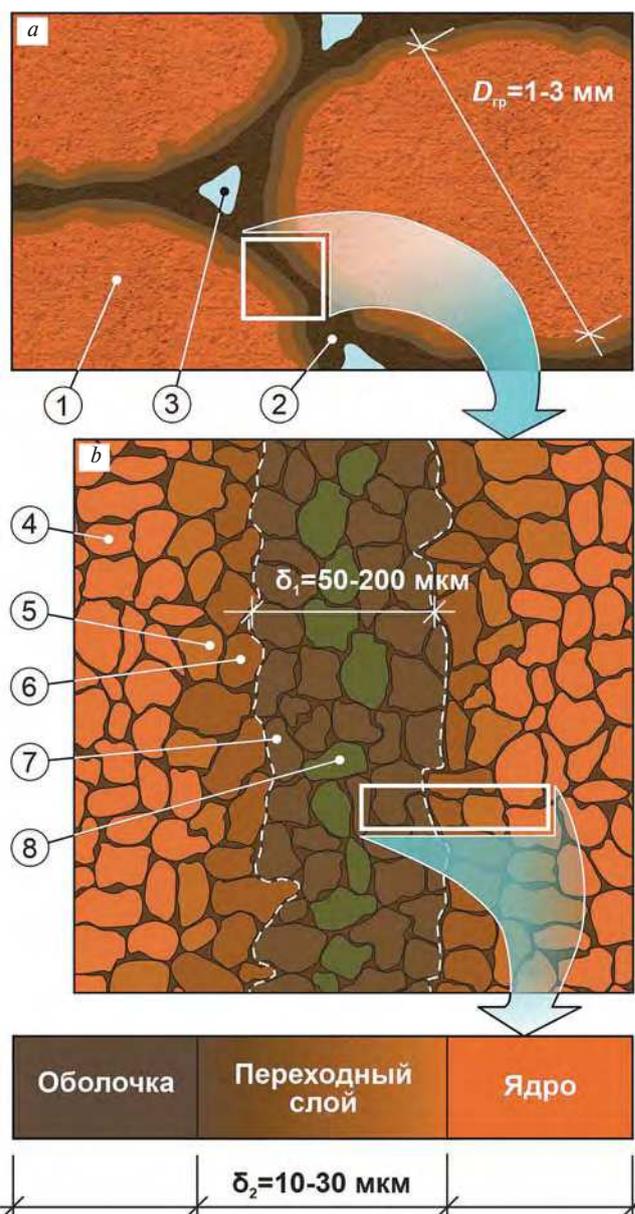


Рис. 1. Модель формирования стеновой керамики объемного окрашивания: матричная структура (а) и схема перехода от ядра к оболочке (б): 1 – агрегированное ядро из глинистого сырья; 2 – красящая оболочка из техногенных отходов; 3 – пора; 4 – обожженная частица глины; 5, 6, 7 – частицы полихромного и диффузного слоев; 8 – зерно из техногенных отходов

Fig. 1. Model of the formation of bulk colored wall ceramics: matrix structure (a) and the scheme of transition from core to shell (b): 1 – aggregated core from clay raw materials; 2 – paint coat made of industrial waste; 3 – a pore; 4 – fired clay particle; 5, 6, 7 – particles of polychrome and diffuse layers; 8 – grain from industrial waste

лочкой, что согласуется с результатами исследований петрографических шлифов. Формирование переходной, буферной зоны снижает термические напряжения на границе между ядром и оболочкой и повышает стабильность дисперсной системы в целом, что подтверждается результатами проведенных рентгенофазового анализа и дилатометрических исследований.

Проведены комплексные исследования фазового состава полученных керамических матричных композитов. Петрографическими исследованиями в

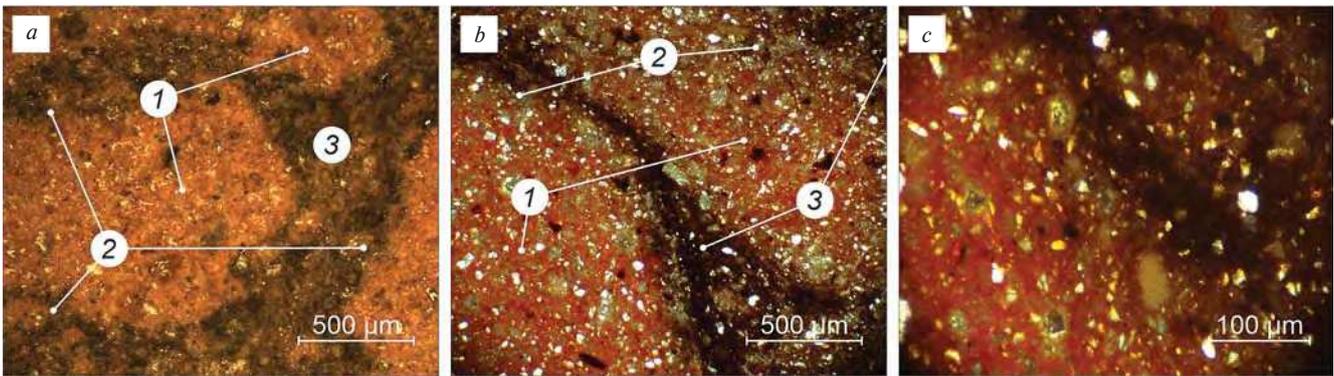


Рис. 2. Микроструктура керамических матричных композитов из ленинск-кузнецкой глины и марганцевой пыли газоочистки: *a* – аншлиф, отраженный свет, николи II; *b, c* – шлиф, проходящий свет, николи +; 1 – ядро; 2 – переходный слой; 3 – оболочка (матрица)
Fig. 2. Microstructure of ceramic matrix composites produced from Leninsk-Kuznetsk clay and manganese dust of gas cleaning: *a* – polished section, reflected light, nicoli II; *b, c* – microsection, transmitted light, nicoli +; 1 – core; 2 – transition layer; 3 – shell (matrix)

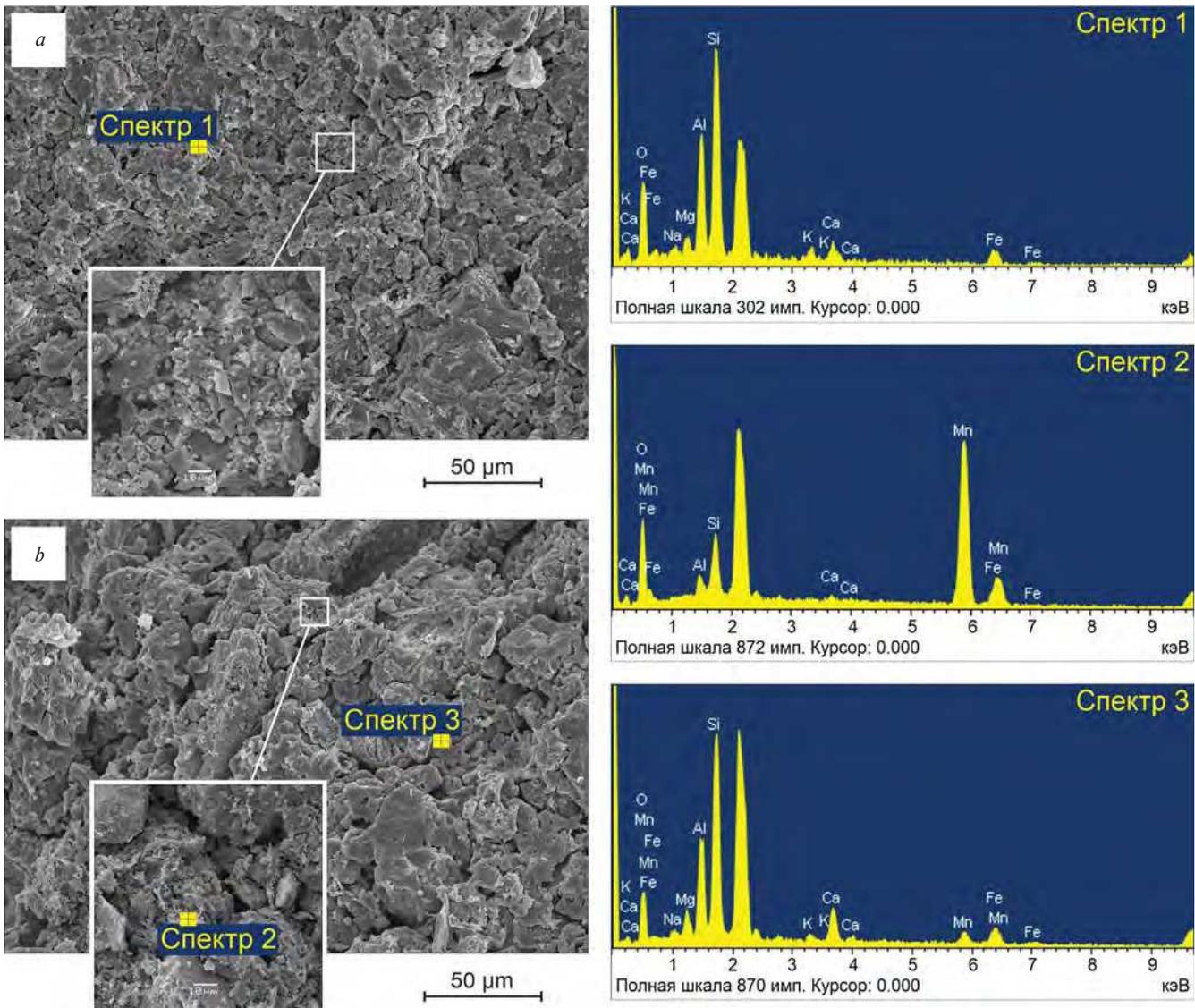


Рис. 3. Микрофотографии дисперсной фазы (*a*) и дисперсионной среды (*b*) керамического матричного композита из ленинск-кузнецкой глины и марганцевой пыли газоочистки, (сканирующий электронный микроскоп)
Fig. 3. Micrographs of the dispersed phase (*a*) and the dispersion medium (*b*) of a ceramic matrix composite made of Leninsk-Kuznetsk clay and manganese dust of gas purification, scanning electron microscope

ядре керамического материала диагностированы минералы гематита, реликтового кварца, полевого шпата и пироксена с характерными оптическими свойствами. В оболочке ядер зафиксированы новообразованные кристаллы с коричнево-черными внутренними рефлексами, вероятно, относящиеся к группе шпинелидов, а также конгломератные образования в виде рудных минералов сложного состава.

Данные порошковых рентгеновских дифрактограмм ядра и матрицы керамического композита, полученных по разработанной методике [27], согласуются с результатами оптической, электронной микроскопии и термического анализа. Установлено, что при обжиге керамики в теле и на границе гранул протекают процессы твердо- и жидкофазного спекания: в ядре происходят полиморфные превращения кварца, разложение карбонатов и слоистых силикатов. Появление расплава в оболочке и переходном слое способствует протеканию реакций в твердой фазе с образованием сложных оксидов: биксбиита, гаусманита и якобсита. Стеклофаза заполняет межзерновые пустоты, связывает частицы оболочки и ядра между собой и обеспечивает после обжига темно-коричневую объемную окраску керамического материала.

Поровая структура матричного композита из глины и марганецсодержащих отходов представлена порами длиной до 700 мкм и диаметром до 200 мкм, образованными по контуру ядер за счет запрессовки воздуха при формовании изделий. В ядрах наблюдаются обеспечивающие требуемую морозостойкость микропоры округлой формы средним диаметром 5–20 мкм, в матрице – вытянутые и петельчатые, открытые поры высокой связности размером 30–100 мкм.

Научные принципы создания стеновых керамических материалов объемного окрашивания с матричной структурой

По результатам апробации научных разработок, отмеченных выше, впервые были сформулированы принципы создания новых керамических материалов объемного окрашивания с пространственно-организованной структурой, которые определили основные научные составляющие настоящей работы:

1. Введение красящего компонента в матрицу керамического композиционного материала путем агрегирования базового компонента шихты в гранулы диаметром 1–3 мм, нанесения на них оболочки толщиной 0,05–0,2 мм из красящего компонента с последующим прессованием, сушкой и обжигом.

2. Концентрация красящего компонента в количестве 5–10 мас. % от состава шихты в матрице керамического композита при содержании хромофоров в красящем компоненте не менее 33%.

3. Использование полиминеральных, умеренно- и среднепластичных глин с высоким содержанием красящих оксидов в качестве базового компонента и железо-, марганец- и ванадийсодержащих техногенных продуктов в качестве красящих компонентов.

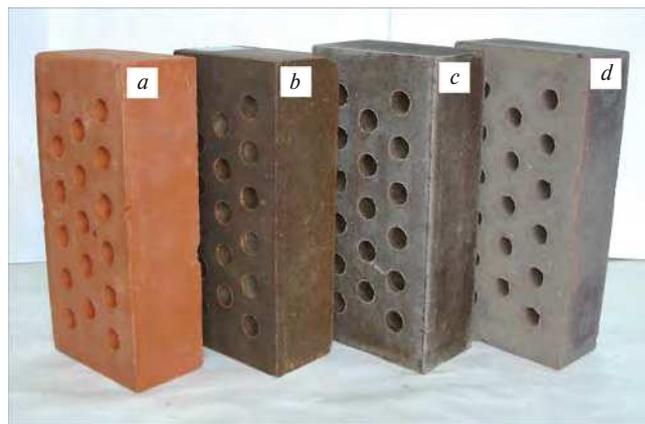


Рис. 4. Внешний вид керамического кирпича объемного окрашивания с матричной структурой из: *a* – бердского суглинка (контрольный образец); *b* – бердского суглинка и отходов добычи и обогащения марганцевых руд; *c* – ленинск-кузнецкой глины и марганцевой пыли газоочистки; *d* – шламистых железорудных отходов, ленинск-кузнецкой глины и ванадиевого шлака

Fig. 4. External appearance of ceramic bricks of volumetric coloring with a matrix structure made of: *a* – Berdsk loam (control sample); *b* – Berdsk loam and waste from the extraction and processing of manganese ores; *c* – Leninsk-Kuznetsk clay and manganese dust of gas cleaning; *d* – slime iron ore waste, Leninsk-Kuznetsk clay and vanadium slag

4. Отношение мольной доли оксидов-хромофоров (MnO_2 , V_2O_5 , Fe_2O_3) в матрице к сумме мольных долей кремнезема, глинозема, оксидов щелочно-земельных и щелочных металлов ($SiO_2 + Al_2O_3 + CaO + MgO + R_2O$) в количестве 0,3–0,5.

5. Обеспечение взаимодействия компонентов ядра и оболочки с образованием переходного слоя на границе между ними, имеющего стеклокристаллическую структуру и толщину не более половины радиуса гранулы.

Опытно-промышленная апробация

На Бердском кирпичном заводе (Новосибирская обл.), работающем по технологии полусухого прессования, проведены опытно-промышленные испытания по выпуску керамического кирпича объемного окрашивания с матричной структурой.

Из пресс-порошков оптимальных шихтовых составов по установленным параметрам и режимам был получен кирпич коричневого и темно-серого цветов (рис. 4), соответствующий требованиям ГОСТ 530–2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия» для марок 150–200. Из шихты на основе глины с добавкой марганецсодержащего техногенного сырья: кирпич пустотелый, одинарный, размера 1НФ; марка по прочности – М150; класс средней плотности – 2; марка по морозостойкости – F50. Из шихты на основе шламистых железорудных хвостов с добавкой ванадийсодержащего техногенного сырья: кирпич пустотелый, одинарный, размера 1НФ; марка по прочности – М200; класс средней плотности – 2; марка по морозостойкости – F75.

На заключительном этапе работы были определены основные технико-экономические показатели разработанной технологии и предложен технологи-

ческий регламент на производство керамического кирпича объемного окрашивания с матричной структурой из суглинки и марганцевой пыли газоочистки мощностью 20 млн шт., включающий характеристику сырьевых материалов, технологическую схему производства, подробное описание технологического процесса и другие разделы.

Выводы

В результате проведенных исследований были сделаны следующие основные выводы:

1. Агрегирование базового компонента шихты в гранулы диаметром 1–3 мм, нанесение на них оболочки толщиной 0,05–0,2 мм из красящего компонента с последующими прессованием, сушкой и обжигом обеспечивают получение объемно-окрашенной стеновой керамики матричной структуры, отвечающей требованиям ГОСТ 530–2012 для марок 150–200 при использовании полиминеральных, умеренно- и среднепластичных глин с высоким содержанием красящих оксидов в качестве базового компонента, марганец- и ванадийсодержащих техногенных продуктов в качестве красящих компонентов.

2. Концентрация красящего компонента в количестве 5–10 мас. % от состава шихты в матрице керамического композита на основе природного и техногенного сырья приводит к образованию при обжиге внутреннего пространственного каркаса и обеспечивает объемное окрашивание керамического материала при содержании хромофоров в красящем компоненте не менее 33%.

Список литературы

1. Столбоушкин А.Ю. Улучшение декоративных свойств стеновых керамических материалов на основе техногенного и природного сырья // *Строительные материалы*. 2013. № 8. С. 24–29.
2. Пищ И.В., Масленникова Г.Н., Гвоздева Н.А., Климош Ю.А., Барановская Е.И. Методы окрашивания керамического кирпича // *Стекло и керамика*. 2007. № 8. С. 15–18.
3. Зубехин А.П., Яценко Н.Д., Голованова С.П. Теоретические основы белизны и окрашивания керамики и портландцемента. М.: Стройматериалы, 2014. 152 с.
4. De Bonis A., Cultrone G., Grifa C. Langella A., Leone A.P., Mercurio M., Morra V. Different shades of red: The complexity of mineralogical and physicochemical factors influencing the colour of ceramics // *Ceramics International*. 2017. Vol. 43. Iss. 11, pp. 8065–1851. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.03.127>
5. Вакалова Т.В., Ревва И.Б., Погребенков В.М. Защитно-декоративные покрытия для строительной керамики на основе природного сырья Западной Сибири // *Стекло и керамика*. 2007. № 1. С. 26–29.

3. Взаимодействие компонентов ядра и оболочки керамических матричных композитов объемного окрашивания приводит к формированию переходного слоя на границе между ними, имеющего стеклокристаллическую структуру и толщину не более половины радиуса гранулы, что обеспечивает повышение прочности материала до 20% при температуре обжига 1000–1050°C.

4. Разработанный метод математического расчета компонентного состава гранулированных шихт позволяет установить количество базового и красящего компонентов, необходимое для получения объемно-окрашенных керамических материалов матричной структуры с требуемыми эксплуатационными характеристиками. Например, для стеновой керамики из ленинск-кузнецкой глины и марганцевой пыли газоочистки количество красящего компонента составляет 7% от общего состава шихты.

5. В результате расчета (по состоянию на II квартал 2021 г.) сметной стоимости строительства, определения затрат на оборудование, сырьевые материалы, энергоресурсы, калькуляции фондов оплаты труда и амортизации были определены основные технико-экономические показатели производства и дана оценка эффективности реализации инвестиционного проекта. При капитальных вложениях в размере 467 млн р. и ежегодных производственных расходах 171 млн р. ежегодная чистая прибыль составит около 106 млн р., а дисконтированный срок окупаемости – 6 лет и 2 месяца.

References

1. Stolboushkin A.Yu. Improving decorative properties of ceramic wall materials produced of technogenic and natural resources. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 8, pp. 24–29. (In Russian).
2. Pishch I.V., Maslennikova G.N., Gvozdeva N.A., Klimosh Yu.A., Baranovskaya E.I. Methods for ceramic bricks staining. *Steklo i keramika*. 2007. No. 8, pp. 15–18. (In Russian).
3. Zubekhin A.P., Yatsenko N.D., Golovanova S.P. Teoreticheskie osnovy belizny i okrashivaniya keramiki i portlandtsementa [Theoretical basis of whiteness and coloring of ceramics and portland cement]. Moscow: Stroymaterialy. 2012. 152 p.
4. De Bonis A., Cultrone G., Grifa C. Langella A., Leone A.P., Mercurio M., Morra V. Different shades of red: The complexity of mineralogical and physicochemical factors influencing the colour of ceramics. *Ceramics International*. 2017. Vol. 43. Iss. 11, pp. 8065–1851. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.03.127>
5. Vakalova T.V., Revva I.B., Pogrebenkov V.M. Protective and decorative coatings for building ceramics based on natural raw materials from Western Siberia. *Steklo i keramika*. 2007. No. 1, pp. 26–29. (In Russian).

6. Захаров А.И., Сурков Г.М. Основы технологии керамики. Глазури и ангобы для керамических изделий // *Стекло и керамика*. 2000. № 11. С. 3–6.
7. Кара-Сал Б.К. Интенсификация спекания легкоплавких глинистых пород с изменением параметров среды обжига // *Стекло и керамика*. 2007. № 3. С. 14–19.
8. Салахов А.М., Морозов В.П., Вагизов Ф.Г., Ескин А.А., Валимухаметова А.Р., Зиннатуллин А.Л. Научные основы управления цветом лицевого кирпича на заводе «Алексеевская керамика» // *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 90–95.
9. Котляр В.Д., Явруян Х.С., Божко Ю.А., Небезжко Н.И. Особенности производства лицевого керамического кирпича мягкой формовки на основе опоковидных пород // *Строительные материалы*. 2019. № 12. С. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-18-22>
10. Верещагин В.И., Шильцина А.Д., Селиванов Ю.В. Моделирование структуры и оценка прочности строительной керамики из грубозернистых масс // *Строительные материалы*. 2007. № 6. С. 65–68.
11. Гурьева В.А., Дубинецкий В.В. Химический метод активации карбонатсодержащих сырьевых компонентов в технологии производства керамического кирпича методом полусухого прессования // *Строительные материалы*. 2021. № 9. С. 28–31. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-28-31>
12. González I., Campos P., Barba-Brioso C., Romero A., Galán E., Mayoral E. A proposal for the formulation of high-quality ceramic “green” materials with traditional raw materials mixed with Al-clays // *Applied Clay Science*. 2016. Vol. 131, pp. 113–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.12.035>
13. Абдрахимов В.З., Колпаков А.В. Экологические, теоретические и практические аспекты использования кальцийсодержащих отходов в производстве керамических материалов // *Известия вузов. Строительство*. 2013. № 7. С. 28–36.
14. Яценко Н.Д., Зубехин А.П. Научные основы инновационных технологий керамического кирпича и управление его свойствами в зависимости от химико-минералогического состава сырья // *Строительные материалы*. 2014. № 4. С. 28–31.
15. Wiemes L., Pawlowsky U., Mymrin V. Incorporation of industrial wastes as raw materials in brick’s formulation // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 142, pp. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.174>
16. Бурученко А.Е. Возможности использования вторичного сырья для получения строительной керамики и ситаллов // *Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки*. 2013. № 3 (18). С. 7–14.
6. Zaharov A.I., Surkov G.M. Basics of ceramic technology. Glazes and engobes for ceramic products. *Steklo i keramika*. 2000. No. 11, pp. 3–6. (In Russian).
7. Kara-Sal B.K. Intensification of sintering of fusible clay rocks with a change in the parameters of the firing medium. *Steklo i keramika*. 2007. No. 3, pp. 14–19. (In Russian).
8. Salahov A.M., Morozov V.P., Vagizov F.G., Eskin A.A., Valimuhametova A.R., Zinnatullin A.L. The scientific basis of color management of face brick at the Alekseevskaya Ceramics factory. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 3, pp. 90–95. (In Russian).
9. Kotlyar V.D., Yavruyan Kh.S., Bozhko Yu.A., Nebezjko N.I. Features of the production of soft-formed facing ceramic bricks based on opoka-like rocks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 12, pp. 18–23. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-18-22>
10. Vereshchagin V.I., Shil'tsina A.D., Selivanov Yu.V. The structure modeling and strength evaluation of construction ceramics from coarse-grained masses. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 6, pp. 65–68. (In Russian).
11. Gur'eva V.A., Dubinetskiy V.V. Chemical method of activation of carbonate-containing raw materials in the technology of production of ceramic bricks by the method of semi-dry pressing. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 9, pp. 28–31. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-28-31> (In Russian).
12. González I., Campos P., Barba-Brioso C., Romero A., Galán E., Mayoral E. A proposal for the formulation of high-quality ceramic “green” materials with traditional raw materials mixed with Al-clays. *Applied Clay Science*. 2016. Vol. 131, pp. 113–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.12.035>
13. Abdrahimov V.Z., Kolpakov A.V. Ecological, theoretical and practical aspects of the use of calcium-containing waste in the production of ceramic materials. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2013. No. 7, pp. 28–36. (In Russian).
14. Yatsenko N.D., Zubekhin A.P. Scientific basis of innovative technologies of ceramic bricks and its properties management, depending on the chemical and mineralogical composition of raw materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 4, pp. 28–31. (In Russian).
15. Wiemes L., Pawlowsky U., Mymrin V. Incorporation of industrial wastes as raw materials in brick’s formulation. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 142, pp. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.174>
16. Buruchenko A.E. Possibilities of using secondary raw materials for the production of building ceramics and sitalls. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*. 2013. No. 3 (18), pp. 7–14. (In Russian).

17. Масленникова Г.Н., Пищ И.В. Керамические пигменты. М.: Стройматериалы, 2009. 224 с.
18. Trojan J., Karolová L., Luxová J., Trojan M. Synthesis of SnO₂/Cr pigments doped by praseodymium prepared by different methods and their pigmentary properties // *Ceramics-Silikáty*. 2016. No. 60 (3), pp. 234–242. DOI: <https://doi.org/10.13168/cs.2016.0035>
19. Ovčáčíková H., Vlček J., Klárová M., Topinková M. Metallurgy dusts as a pigment for glazes and engobes // *Ceramics International*. 2017. Vol. 43. Iss. 10, pp. 7789–7796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.03.091>
20. Molinari C., Conte S., Zanelli C., Ardit M., Cruciani G., Dondi M. Ceramic pigments and dyes beyond the inkjet revolution: From technological requirements to constraints in colorant design // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. Iss. 14, pp. 21839–21872. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.302>
21. Гуров Н.Г., Гурова О.Е., Стороженко Г.И. Инновационные направления технологической и аппаратурной реконструкции заводов полусухого прессования // *Строительные материалы*. 2013. № 12. С. 52–55.
22. Galindo R., Gargori C., Fas N., Llusar M., Monrós G. New chromium doped powellite (Cr–CaMoO₄) yellow ceramic pigment // *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. Iss. 5. Part A, pp. 6364–6372. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.071>
23. Chen Z., Du Y., Li Z., Sun D., Zhu C. Synthesis of black pigments containing chromium from leather sludge // *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. Iss. 8, pp. 9455–9460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.04.001>
24. Столбоушкин А.Ю. Перспективное направление развития строительных керамических материалов из низкокачественного сырья // *Строительные материалы*. 2018. № 4. С. 24–28. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-24-28>
25. Столбоушкин А.Ю., Акст Д.В., Фомина О.А. Использование промышленных отходов при окрашивании керамических матричных композитов на основе природного и техногенного сырья. *Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: Материалы Всероссийской научно-технической конференции*. Саранск, 2016. С. 154–160.
26. Патент РФ 2701657. *Способ получения сырьевой смеси для декоративной строительной керамики* / Акст Д.В., Столбоушкин А.Ю., Фомина О.А. Заявл. 19.12.2018. Опубл. 30.09.2019. Бюл. № 28.
27. Столбоушкин А.Ю. Метод комплексного исследования переходного слоя ядро–оболочка в керамических матричных композитах полусухого прессования // *Строительные материалы*. 2019. № 9. С. 28–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-28-35>
17. Maslennikova G.N., Pishh I.V. Keramicheskie pigmenty [Ceramic pigments]. Moscow: Stroimaterialy. 2009. 224 p.
18. Trojan J., Karolová L., Luxová J., Trojan M. Synthesis of SnO₂/Cr pigments doped by praseodymium prepared by different methods and their pigmentary properties // *Ceramics-Silikáty*. 2016. No. 60 (3), pp. 234–242. DOI: <https://doi.org/10.13168/cs.2016.0035>
19. Ovčáčíková H., Vlček J., Klárová M., Topinková M. Metallurgy dusts as a pigment for glazes and engobes. *Ceramics International*. 2017. Vol. 43, Iss. 10, pp. 7789–7796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.03.091>
20. Molinari C., Conte S., Zanelli C., Ardit M., Cruciani G., Dondi M. Ceramic pigments and dyes beyond the inkjet revolution: From technological requirements to constraints in colorant design. *Ceramics International*. 2020. Vol. 46, Iss. 14, pp. 21839–21872. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.302>
21. Gurov N.G., Gurova O.E., Storozhenko G.I. Innovative directions of technological and instrumental reconstruction of semi-dry pressing plants. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 12, pp. 52–55. (In Russian).
22. Galindo R., Gargori C., Fas N., Llusar M., Monrós G. New chromium doped powellite (Cr–CaMoO₄) yellow ceramic pigment. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. Iss. 5. Part A, pp. 6364–6372. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.071>
23. Chen Z., Du Y., Li Z., Sun D., Zhu C. Synthesis of black pigments containing chromium from leather sludge. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41, Iss. 8, pp. 9455–9460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.04.001>
24. Stolboushkin A.Yu. A promising direction for the development of building ceramic materials from low-quality raw materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 4, pp. 24–28. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-24-28>
25. Stolboushkin A.Yu., Akst D.V., Fomina O.A. The use of industrial waste when painting ceramic matrix composites based on natural and technogenic raw materials. *Durability of building materials, products and structures: materials of the All-Russian scientific and technical conference*. Saransk. 2016, pp. 154–160. (In Russian).
26. Patent RF 2701657. *Sposob poluchenija syr'evoj smesi dlja dekorativnoj stroitel'noj keramiki* [The method of obtaining a raw mix for decorative construction ceramics]. Akst D.V., Stolboushkin A.Yu., Fomina O.A. Declared 19.12.2018. Published 30.09.2019. Bulletin No. 28. (In Russian).
27. Stolboushkin A.Yu. Method for a comprehensive study of the core-shell transition layer in semi-dry pressing ceramic matrix composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 9, pp. 28–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-28-35>

УДК 691.421

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-17-22>

В.Д. КОТЛЯР, д-р техн. наук (diatomit_kvd@mail.ru),
 Ю.В. ТЕРЁХИНА, инженер, ст. преподаватель (yuliya-2209@mail.ru),
 А.В. КОТЛЯР, канд. техн. наук (toss871@gmail.com),
 Р.А. ЯЩЕНКО, ассистент (roma.8929@mail.ru),
 Н.Е. ДЬЯЧЕНКО, магистр (dia4encko.nikit@yandex.ru)

Донской государственный технический университет (344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1)

Глины Касьминского проявления в Кемеровской области — перспективное сырье для производства клинкерного кирпича

Приведены краткие данные о применении клинкерного кирпича в современном строительстве. На основе анализа указывается, что надежной сырьевой базой для увеличения производства клинкерного кирпича может стать глинистое сырье низкотемпературного спекания, способное давать керамический камень-черепок с водопоглощением менее 2% без признаков пережога в интервале температуры обжига не менее 50°. Подчеркивается, что наиболее остро стоит проблема увеличения производства клинкерного кирпича на востоке страны, одной из причин которой является отсутствие надежной сырьевой базы. Приведены результаты исследований выявленного Касьминского проявления глин с прогнозными ресурсами не менее 5 млн м³, которые относятся к сильноспекающемуся глинистому сырью низкотемпературного спекания с получением керамического камня-черепка бежевого и коричнево-красноватого цвета. Дана характеристика химического и минерального состава, который характеризуется преимущественно как гидрослюдистый с примесью кварца. Показано, что прочность обожженных образцов уже при температуре обжига 1000°C является достаточной для клинкерного кирпича: предел прочности при сжатии 70–75 МПа и при изгибе около 20 МПа. При температуре обжига 1100°C предел прочности при сжатии составляет 90–125 МПа и при изгибе 28–35 МПа. Водопоглощение менее 2,5%, необходимое для дорожного клинкерного кирпича, достигается при температуре обжига 1030–1040°C. На основании результатов проведенных работ с учетом дообжиговых и обжиговых свойств глин, местоположения проявления, горнотехнических условий и запасов глины Касьминского проявления являются весьма перспективными для производства стенового и дорожного клинкерного кирпича в Сибири.

Ключевые слова: глинистое сырье, клинкерный кирпич, спекание, состав, свойства, обжиг.

Для цитирования: Котляр В.Д., Терёхина Ю.В., Котляр А.В., Ященко Р.А., Дьяченко Н.Е. Глины Касьминского проявления в Кемеровской области – перспективное сырье для производства клинкерного кирпича // *Строительные материалы*. 2021. № 12. С. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-17-22>

V.D. KOTLYAR, Doctor of Science (Engineering), Head of the Department of Construction Materials (diatomit_kvd@mail.ru),
 Yu.V. TEREKHINA, Engineer, Lecturer, (yuliya-2209@mail.ru), A.V. KOTLYAR, Candidate of Sciences (Engineering) (toss871@gmail.com),
 R.A. YASHENKO, Engineer, (roma.8929@mail.ru), N.E. DYACHENKO, Master (dia4encko.nikit@yandex.ru)
 Don State Technical University, (1, Gagarina Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation)

Clays of The Kasminky Manifestation in The Kemerovo Region – Promising Raw Materials for Production Clinker Bricks

Provide data on the use of clinker bricks in modern construction are given. Based on the analysis of the decree, it is believed that only clay raw materials of low-temperature sintering can become a reliable raw material base for increasing the production of clinker bricks, capable of producing shingles with a water absorption of less than 2% without signs of burning in the temperature range of at least 50°. It is emphasized that the most acute problem is the increase in the production of clinker bricks in the east of the country, one of the reasons for which is the lack of reliable base raw materials. The results of the studies of the revealed Kasminky manifestation of clays with predicted reserves of at least 5 million m³, which belong to the strongly sintering clay raw materials of low-temperature speckle with a beige and brown-reddish skull, are presented. Provide is a hacteristic chemical and mineral composition, which is characterized mainly as hydro-trace with an admixture of quartz. It is shown that durability of the burned samples already at a temperature of roasting of 1000°C wasps is sufficient for a brick – strength at compression of 70–75 MPa and at a bend about 20 MPa. At a temperature of roasting of 1100°C wasps – strength at compression is 90–125 MPa and at a bend of 28–35 MPa. The water absorption less than 2.5% necessary for a road brick is reached at temperatures of roasting of 1030–1040°C wasps. Based on the results of the work carried out, taking into account the pre-burning and burning properties of clays, the location of the manifestation, mining conditions and reserves, the clay of the Kasminky manifestation is very promising for the production of wall and road clinker bricks in Siberia.

Keywords: clay raw materials, clinker brick, sintering, composition, properties, firing.

For citation: Kotlyar V.D., Terekhina Yu.V., Kotlyar A.V., Yashenko R.A., Dyachenko N.E. Clays of the Kasminky manifestation in the Kemerovo region – promising raw materials for production clinker bricks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 12, pp. 17–22. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-17-22>

В настоящее время в России устойчиво наблюдается увеличение спроса на клинкерный кирпич — как стеновой, так и дорожный. Это естественный эволюционный процесс развития производства и применения изделий грубой керамики с учетом того, что в XX в. в Советском Союзе к керамическому

кирпичу было весьма своеобразное отношение — он воспринимался в основном как материал для возведения стен, от которого не требовалось ни красоты, ни особых физико-технических свойств [1–5]. В XXI в. керамический кирпич сохраняет свою востребованность на рынке строительных материалов, при

этом нормативно-техническая база, проектные решения, производственные возможности кирпичных заводов задают и реализуют требования как к физико-механическим показателям, так и к эстетической выразительности лицевой поверхности [6]. Отдельной линейкой продукции выступает стеновой клинкерный кирпич, обладающий повышенной прочностью – предел прочности при сжатии от 30 до 100 МПа; морозостойкостью – марка не ниже F75; водопоглощением – не более 6%; кислотостойкостью – не менее 95%. Повышенные требования к показателям качества изделий обеспечивают эксплуатацию объектов из клинкерного кирпича на долгие годы, даже в умеренно и сильноагрессивных условиях [7–9].

Для масштабного производства клинкерного кирпича на существующих заводах необходимо иметь глинистое сырье низкотемпературного спекания, дающее прочный камень-черепок и минимальное водопоглощение при температуре обжига 1050–1100°C, а также разнообразную цветовую гамму для обеспечения номенклатуры и ассортимента изделий по цветам.

Глины низкотемпературного спекания являются дефицитным сырьем, поэтому кирпичные заводы европейской части России, выпускающие клинкерный кирпич, используют в производстве различные виды глин как близко расположенных месторождений, так и привозное сырье из стран СНГ [10, 11]. Стоимость единицы продукции и близость рынка сбыта экономически оправдывают затраты на доставку сырья за 1–1,5 тысяч километров. Гораздо сложнее ситуация на востоке страны, где доставка глинистого сырья из европейской части России экономически неоправданна. Поэтому создание надежной сырьевой базы, территориально отнесенной к крупным промышленным центрам Сибири, является первым шагом для налаживания производства клинкерного кирпича на востоке страны. Это достаточно сложная задача, так как основной сырьевой базой стеновой керамики Сибири в настоящее время являются лессовидные суглинки, которые широко

распространены в Новосибирской, Томской, Кемеровской и других областях и которые не спекаются до водопоглощения менее 6% с приемлемым интервалом спекания [12–15].

Специалистами Донского государственного технического университета совместно с заинтересованными организациями Новосибирской и Кемеровской областей в последние годы ведутся активные работы по поиску и вовлечению в производство глинистого сырья низкотемпературного спекания, способного после обжига давать камень-черепок с водопоглощением менее 2% без признаков пережога. Условно работы были разделены на три этапа. Первый этап – это работа с фондовыми материалами в территориальных фондах геологической информации по Сибирскому федеральному округу. Второй этап – обследование и опробование выявленных перспективных проявлений глинистого сырья. И третий



Рис. 1. Внешний вид в разрезе глин Касьминского проявления
Fig. 1. Sectional view of clays of the Kasmina occurrence



Рис. 2. Внешний вид отобранных проб глин в рыхлом состоянии
Fig. 2. Appearance of selected samples of clay in a loose state



Рис. 3. Крупнозернистые включения
Fig. 3. Coarse-grained inclusions

Результаты химического анализа, мас. %
Chemical analysis results, % by weight

Шифры проб	ППП	SiO ₂ общ.	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ общ.	CaO	MgO	SO ₃ общ.	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂
КП-1с	6,41	64,85	19,07	2,11	1,67	1,02	0,17	2,51	0,14	0,17	0,78
КП-2т	6,65	62,95	16,76	6,66	1,1	0,98	0,1	3,4	0,2	0,18	0,75

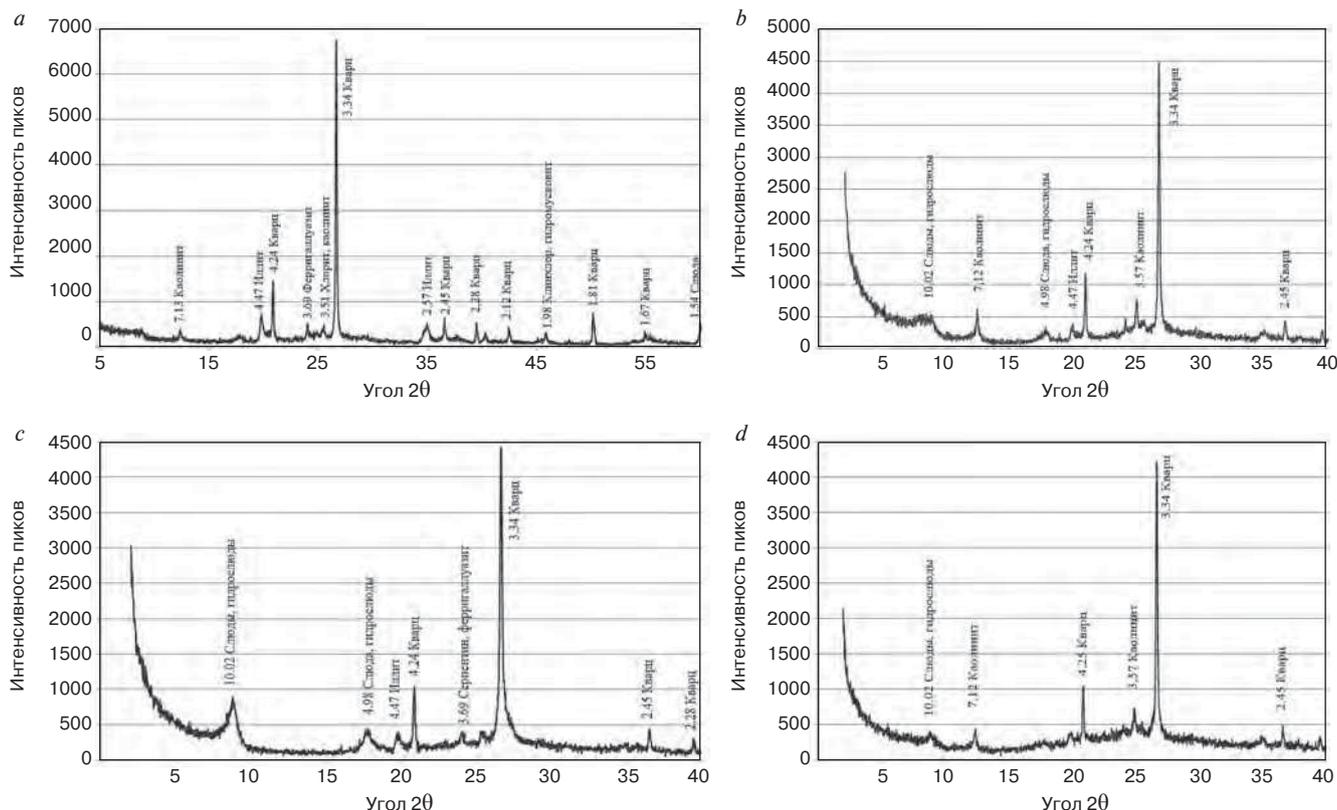


Рис. 4. Рентгенограмма образца КП-1с: *a* – валового; *b* – ориентированного; *c* – обожженного; *d* – насыщенного этиленгликолем
Fig. 4. X-ray of sample КП-1с: *a* – the bulk; *b* – oriented specimen; *c* – fired specimen; *d* – sample saturated with ethylene glycol

этап – это лабораторно-технологические исследования глинистого сырья.

В результате работ по 1-му этапу – изучению материалов по Мусохрановскому месторождению огнеупорных глин авторами было выявлено перспективное Касьминское проявление, названное по реке Касьма в Кемеровской области. Касьминское проявление находится к западу от Мусохрановского месторождения, которое в настоящее время не имеет перспектив практического применения, так как оставшиеся запасы, по сути, не являются огнеупорным спекающимся глинистым сырьем. Отобранные и изученные пробы в старом карьере показали, что в его составе присутствует более половины тонкодисперсного кварца – менее 10 мкм и около 20–30% каолинита. Соответственно, данное глинистое сырье дает после обжига светлый камень-черепок, но не спекается при температуре до 1500°C, а сам обожженный материал не обладает необходимой прочностью.

Участок Касьминского проявления в геоморфологическом отношении представляет собой слегка

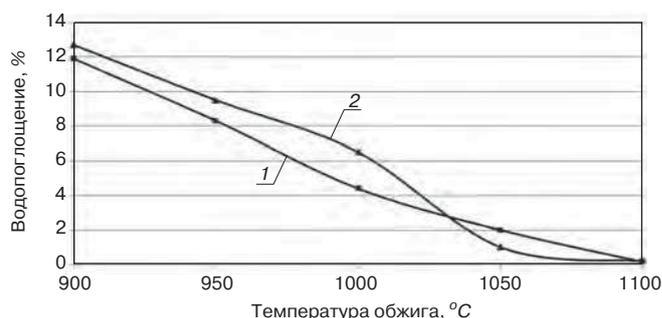


Рис. 5. Зависимость водопоглощения от температуры обжига: 1 – КП-1с; 2 – КП-2т

Fig. 5. Dependence of water absorption on the firing temperature: 1 – КП-1с; 2 – КП-2т

всхолмленную равнину с абсолютными отметками 190–200 м и благоприятными горнотехническими условиями. Возраст исследуемого глинистого сырья относится к нижнепалеогеновому. Исследования защищенного шурфа, выработанного местным населением для собственных нужд, позволило установить, что полезная толща представлена разнослойной пестроцветной толщей – от светло-серого до темно-ко-

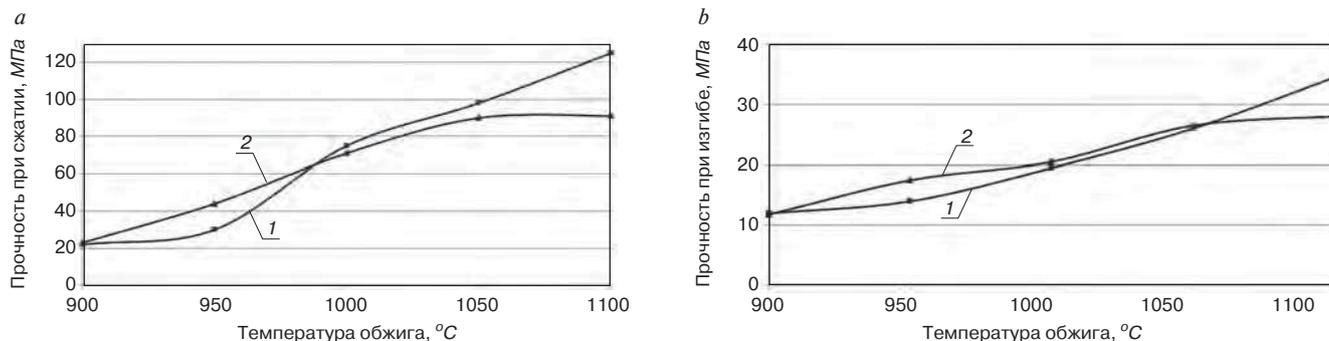


Рис. 6. Зависимость предела прочности при сжатии (а) и при изгибе (б) от температуры обжига: 1 – КП-1с; 2 – КП-2т
 Fig. 6. Compressive strength (a) and bending strength (b) dependence on the firing temperature: 1 – КП-1с; 2 – КП-2т

ричного цвета со всеми промежуточными оттенками, включениями и редкими прослойками, обогащенными органическим материалом (рис. 1). Визуально авторами было выделено два горизонта глины, условно названные «светлый» и «темный» с мощностью около 3–3,5 м каждый. Из каждого горизонта были отобраны бороздовые пробы, на основе которых были сформированы лабораторно-технологические с присвоенными шифрами: КП-1с и КП-2т. Подошва глинистой толщи вскрыта не была, но предположительно общая мощность глинистой толщи составляет 10–12 м.

Лабораторно-технологические испытания позволили установить, что глины Касьминского проявления являются вполне пригодным сырьем для производства стенового и дорожного клинкерного кирпича. Структура глин комковатая, мелкокомковатая, пелитовая, с прослойками пелито-псаммитовой структуры. Текстура рыхловатая, сыпучая с неярко выраженной слоистостью (рис. 2). Содержание крупнозернистых включений составляет от 1 до 3%. В верхнем горизонте (проба КП-1с) это зерна кварца, гидроксидов железа, известкового средне- и малоактивного песчаника, железомарганцевые стяжения. В нижнем горизонте преобладают железистые и железомарганцевые стяжения (рис. 3).

По содержанию тонкодисперсных фракций верхний горизонт относится к среднечисперсной группе, нижний – к низкодисперсной. По пластичности оба вида глин являются среднепластичными, со средней чувствительностью к сушке и умеренной механической прочностью. Формовочная влажность глин составляет около 22%, а воздушная усадка около 7,5%. По огнеупорности оба вида глин классифицируются

как легкоплавкие с температурой падения пироскопов 1280–1310°C. Усредненный химический состав двух выделенных горизонтов представлен в таблице.

Как видно из химического состава, оба горизонта глин по содержанию Al_2O_3 классифицируются как полукислые. В зависимости от содержания красящих оксидов (Fe_2O_3 и TiO_2) в прокаленном состоянии проба КП-1с относится к группе со средним содержанием красящих оксидов, а проба КП-2т – с высоким содержанием красящих оксидов. Содержание водорастворимых солей составляет от 8 до 9,5 мг·экв. По соотношению оксидов проба КП-1с, согласно диаграмме А.И. Августиника, попадает почти в центр области гончарных глин, проба КП-2т также в область гончарных, но только сдвинута вправо и больше перекрывается областью кирпичных глин [16].

Рентгенографические исследования позволили установить, что минеральный состав глинистого сырья представлен гидрослюдисто-каолинитовым составом с преобладанием гидрослюд и существенной примесью кварца. На рис. 4 для примера показаны рентгенограммы валового образца, ориентированного, обожженного и насыщенного этиленгликолем пробы КП-1с.

По степени спекания две исследованные лабораторно-технологические пробы глин Касьминского проявления похожи между собой. Огневая усадка при температуре 1000°C для обеих проб составляет 4,5%, при температуре 1050°C для пробы КП-1с – 5%, для пробы КП-2т – 5,9%. Водопоглощение менее 5% без признаков пережога достигается для пробы КП-1с при температуре 985°C, для пробы КП-2т при температуре 1020°C (рис. 5). Обожженные образцы на основе глин Касьминского проявления

имеют достаточно высокую прочность. На рис. 6 показаны зависимости предела прочности при сжатии и изгибе от температуры обжига. Как видно, уже при температуре обжига 1000°C образцы имеют прочность, достаточную для клинкерного кирпича, – предел прочности при сжатии 70 МПа и при изгибе около 20 МПа.

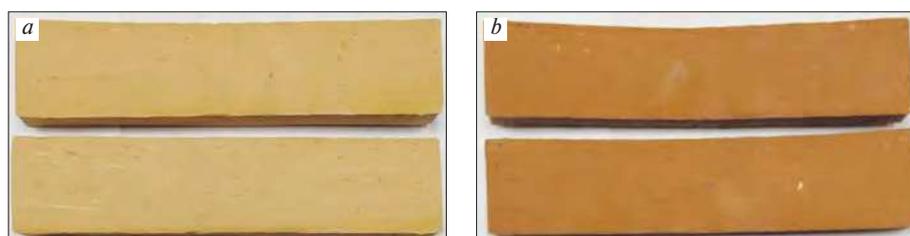


Рис. 7. Цвет образцов, обожженных при температуре 1000°C: а – проба КП-1с; б – проба КП-2т
 Fig. 7. Color of specimens fired at 1000°C: a – sample КП-1с; b – sample КП-2т

При температуре обжига 1050°C предел прочности при сжатии 90–95 МПа и при изгибе 25 МПа. Водопоглощение менее 2,5%, необходимое для дорожного клинкерного кирпича, достигается при температуре обжига 1050°C. Показатели по водопоглощению, огневой усадке и прочности образцов, обожженных при различных температурах, между собой логично связаны. Также данные показатели отвечают химическому и минеральному составу исследуемого глинистого сырья.

Цвет обожженных образцов пробы КП-1с бежевый, пробы КП-2т коричнево-красноватый (рис. 7). Комбинирование выделенных горизонтов позволит

получать промежуточные оттенки. На образцах не наблюдалось отколов, связанных с известковыми включениями, а также высолообразования. Образцы, обожженные при температуре 1000–1100°C, выдержали 75 циклов попеременного замораживания и оттаивания без разрушения.

Дообжиговые и обжиговые свойства глин, местоположение, горнотехнические условия разработки и прогнозные ресурсы, которые составляют не менее 5 млн м³, делают Касьминское проявление весьма перспективным для дальнейшего изучения и организации на его основе производства стенового и дорожного клинкерного кирпича в Сибири.

Список литературы

1. Лапунова К.А., Котляр В.Д. Дизайн архитектурно-строительной керамики в историческом аспекте // *Науковедение*. 2013. № 3 (16). С. 121.
2. История возникновения кирпича // *Интернет-ресурс «Кирпичная библиотека»*. <https://brick-library.ru/istoriya-vozniknoveniya-kirpicha/> (дата обращения: 01.12.2021)
3. Лапунова К.А., Котляр В.Д. Дизайн формы архитектурной стеновой керамики в историческом аспекте // *Вестник МГСУ*. 2009. № 4. С. 148–153.
4. Гаврилов А.В., Гринфельд Г.И. Краткий обзор истории, состояния и перспектив рынка клинкерного кирпича в России // *Строительные материалы*. 2013. № 4. С. 20–22.
5. Божко Ю.А., Лапунова К.А., Волкодаева И.Б. Исторический аспект развития дизайна лицевого кирпича от древнейших времен до наших дней // *Дизайн и технологии*. 2020. № 77 (119). С. 6–13.
6. Месхи Б.Ч., Божко Ю.А., Терехина Ю.В., Лапунова К.А. Brick-дизайн и его основные элементы // *Строительные материалы*. 2020. № 8. С. 47–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-783-8-47-51>
7. Шлегель И.Ф. О рациональном применении клинкерного кирпича (в порядке обсуждения) // *Строительные материалы*. 2017. № 8. С. 42–44.
8. Божко Ю.А. Технологические и эстетические особенности клинкерного кирпича в современной архитектуре // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2017. Т. 3. № 1. С. 148–153.
9. Наумов А.А. Лицевой и клинкерный кирпич из кремнистого сырья Шевченковского месторождения // *Строительные материалы*. 2017. № 4. С. 14–18.
10. Корепанова В.Ф., Гринфельд Г.И. Производство клинкерного кирпича на Никольском кирпичном заводе Группы ЛСР // *Строительные материалы*. 2014. № 4. С. 10–13.
11. Семёнов А.А. Российский рынок керамического кирпича. Тенденции и перспективы развития // *Строительные материалы*. 2020. № 12. С. 4–5. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-787-12-4-5>

References

1. Lapunova K.A., Kotlyar V.D. Design of architectural and building ceramics in a historical aspect. *Naukovedenie*. 2013. No. 3 (16). p. 121. (In Russian)
2. Brick history. *Internet-resurs «Kirpichnaya biblioteka»*. <https://brick-library.ru/istoriya-vozniknoveniya-kirpicha/> (Date of access: 01.10.2021)
3. Lapunova K.A., Kotlyar V.D. The design of the form of architectural wall ceramics in the historical aspect. *Vestnik MGSU*. 2009. No. 4, pp. 148–153. (In Russian).
4. Gavrilov A.V., Grinfel'd G.I. A brief overview of the history, state and prospects of the clinker brick market in Russia. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2013. No. 4, pp. 20–22. (In Russian).
5. Bozhko Yu.A., Lapunova K.A., Volkodaeva I.B. The historical aspect of the development of facing brick design from ancient times to the present day. *Dizain i tekhnologii*. 2020. No. 77 (119), pp. 6–13. (In Russian).
6. Meskhi B.Ch., Bozhko Yu.A., Terekhina Yu.V., Lapunova K.A. Brick-design and its main elements. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2020. No. 8, pp. 47–51. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-783-8-47-51>
7. Shlegel' I.F. On the rational use of clinker bricks (as a matter for discussion). *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2017. No. 8, pp. 42–44. (In Russian).
8. Bozhko Yu.A. Technological and aesthetic features of clinker bricks in modern architecture. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2017. Vol. 3. No. 1, pp. 148–153. (In Russian).
9. Naumov A.A. Front and clinker bricks from siliceous raw materials of the Shevchenkovsky deposit. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2017. No. 4, pp. 14–18. (In Russian).
10. Korepanova V.F., Grinfel'd G.I. Production of clinker bricks at the Nikolsky brick factory of the LSR Group. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2014. No. 4, pp. 10–13. (In Russian).
11. Semenov A.A. Russian ceramic brick market. Trends and prospects for development. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2020. No. 12, pp. 4–5. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-787-12-4-5>

12. Столбоушкин А.Ю., Фомина О.А., Акст Д.В., Захарченко Л.Е. Особенности глинистого сырья Западной Сибири как сырьевой базы строительной керамики // *Вестник Тувинского государственного университета: Технические и физико-математические науки*. 2019. Вып. 3 (42). С. 27–36.
13. Столбоушкин А.Ю. Перспективы создания технологии строительных керамических матричных композитов в Кузбассе. *Наука и профессиональное образование: национальные приоритеты и региональные драйверы развития. Материалы I Всероссийской научно-практической конференции*. Кемерово. 12 февраля 2019 г. С. 113–115.
14. Вакалова Т.В., Погребенков В.М., Ревва И.Б. Перспективы расширения отечественной сырьевой базы строительной керамики за счет комплексного использования месторождений глинистого сырья // *Вестник науки Сибири*. 2012. № 1 (2). С. 339–347.
15. Стороженко Г.И., Шоева Т.Е., Пшенникова В.В. Исследование сырьевых материалов Западной Сибири для производства керамических облицовочных материалов // *Строительные материалы*. 2021. № 9. С. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-23-27>
16. Августиник А.И. Керамика. Л.: Стройиздат, 1975. 592 с.
12. Stolboushkin A.Yu., Fomina O.A., Akst D.V., Zakharchenko L.E. Peculiarities of clay raw materials of Western Siberia as a raw material base of construction ceramics. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta: Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*. 2019. No. 3 (42), pp. 27–36. (In Russian).
13. Stolboushkin A.Yu. Prospects of construction ceramic matrix composites technology in Kuzbass. *Science and vocational education: national priorities and regional drivers of development. Materials of the I All-Russian scientific-practical conference*. Kemerovo. February 12, 2019, pp. 113–115. (In Russian).
14. Vakalova T.V., Pogrebenkov V.M., Revva I.B. Prospects of expansion of domestic raw material base of construction ceramics due to complex use of clay raw material deposits. *Vestnik nauki Sibiri*. 2012. No. 1 (2), pp. 339–347. (In Russian).
15. Storozhenko G.I., Shoeva T.E., Pshennikova V.V. Research of raw materials of Western Siberia for the production of ceramic facing materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 9, pp. 23–27. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-23-27>
16. Avgustinik A.I. Keramika [Ceramics]. Leningrad: Stroyizdat. 1975. 592 p.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**Энциклопедия старинных кирпичей и черепицы из собрания музея «Кирпичная библиотека»****Автор: Талпа Б.В.****Издательство Южного федерального университета, 2021. 432 с.**

Энциклопедия состоит из девяти разделов. Представлены старинные кирпичи и черепица Российской империи (42 региона), Австро-Венгерской, Британской, Византийской, Османской, Римской империй, Древнего Египта и Греции и других европейских и азиатских стран. Имеются раритетные кирпичи из Карнакского храма (Египет, IV тыс. до н. э.), Московского, Казанского, Тульского, Астраханского, Ярославского, Свяжского Кремля, а также Китай-города, Помпеев, Рима, Вены, Лондона, Сиены, Ливорно, Риги, Санкт-Петербурга, Свято-Троицкой Сергиевой лавры, Валаамского, Новодевичьего монастырей, Гефсиманского Черниговского скита, крепостей Дальнего Востока, замков рыцарей Ливонского и Тевтонского орденов, Китая, Японии, Швеции, Дании, Индии, Туниса, Таиланда и др. Каждый образец кирпича и черепицы сопровождается информацией (статьей) о месте находки, производителе, сырьевой базе, технологии и времени производства, а также

об исторических сооружениях, построенных из этих материалов. Прилагаются исторические документы, картографические материалы, биографические сведения о производителях, ссылки на исторические справочники. Энциклопедия содержит более 2000 фотографий, рисунков, карт. Кирпич – один из первых инновационных материалов, созданных человеком, полностью преобразивший образ его жизни. Древние кирпичные постройки заложили основы архитектуры, культуры и технологии строительства. Кирпич позволил людям расселиться в неблагоприятных для проживания климатических условиях. Необходимость в качественном керамическом сырье заложила первые знания о геологическом строении, минералогических особенностях и технологических свойствах глинистых пород. Энциклопедия предназначена для широкого круга специалистов в области керамической промышленности, строительства и архитектуры, наук о Земле, истории и археологии, коллекционеров, молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников старших классов.

Энциклопедия реализуется по предварительному заказу. Возможна доставка по почте (добавляется стоимость почтовых расходов). Заказ высылать на электронную почту talpabv@gmail.com, по телефону или WhatsApp +7-928-188-41-41, Талпа Борис Васильевич. Тираж ограничен.

Х.С. ЯВРУЯН, канд. техн. наук (khungianos@mail.ru), А.В. КОТЛЯР, канд. техн. наук, (toss871@gmail.com),
Е.С. ГАЙШУН, ассистент (subaru156@yandex.ru), А.С. ГАЙШУН, бакалавр (subaru156@yandex.ru)

Донской государственный технический университет (344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

Общая характеристика террикоников Восточного Донбасса и продуктов их переработки как сырья для производства изделий стеновой керамики

Показана актуальность для Юга России поиска и создания новой нетрадиционной сырьевой базы стеновой керамики в связи с уменьшающейся доступностью традиционного сырья – суглинков. Представлена классификация по объемам слагающих пород: шахтные терриконы и отвалы обогатительных фабрик Восточного Донбасса. Дана характеристика их минерального и химического состава. Установлено, что углепромышленные отходы отличаются большим разнообразием по минеральному составу, что являлось серьезным сдерживающим фактором для их промышленного освоения. Представлена классификация продуктов переработки террикоников по литологическому составу, содержанию угля и фракционному составу слагающих пород. По фракционному составу выделено пять групп, по минералого-петрографическому составу выделено четыре группы, по содержанию угля также выделено четыре группы. Отмечается, что мелкие и тонкие материалы содержат уголь в повышенном количестве и за счет этого не могут рассматриваться как основное сырье для производства керамических камней. Материалы средней группы по зерновому составу (2–5 мм, отсева) могут содержать в своем составе до 2–3% угля и чаще всего представлены смесью аргиллитов, алевролитов и песчаников с преобладанием той или иной разновидности пород. В силу этих особенностей материалы средней группы представляют наибольший интерес как основное сырье для производства крупноформатных высокопустотных керамических камней и кирпича.

Ключевые слова: стеновая керамика, терриконики, техногенное сырье, классификация, уголь.

Для цитирования: Явруян Х.С., Котляр В.Д., Гайшун Е.С., Гайшун А.С. Общая характеристика террикоников Восточного Донбасса и продуктов их переработки как сырья для производства изделий стеновой керамики // *Строительные материалы*. 2021. № 12. С. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-23-27>

Kh.S. YAVRUYAN, Candidate of Sciences (Engineering), A.V. KOTLYAR, Candidate of Sciences (Engineering) (toss871@gmail.com),
E.S. GAISHUN, Assistant (subaru156@yandex.ru), A.S. GAISHUN, Bachelor (subaru156@yandex.ru)
Don State Technical University (1, Gagarina Square, Rostov-on-Don, 344010, Russian Federation)

General Characteristics of the Refuse Heaps of Eastern Donbass and Products of their Processing as Raw Materials for the Production of Wall Ceramics

The relevance for the south of Russia of the search and creation of a new non-traditional raw material base of wall ceramics in connection with the decreasing availability of traditional raw materials – loams is shown. The classification according to the volumes of composing rocks is presented: mine waste heaps and dumps of processing plants of Eastern Donbass. Their characteristics of mineral and chemical composition are given. It is noted that coal-industrial waste is very diverse in its mineral composition, which was a serious deterrent to their industrial development. The classification of waste materials processing products by lithological composition, coal content and fractional composition of composing rocks is presented. According to the fractional composition, 5 groups were allocated, four groups were allocated according to the mineralogical and petrographic composition, 4 groups were also allocated according to the coal content. It is noted that small and thin materials contain coal in an increased amount and due to this cannot be considered as the main raw material for the production of ceramic stones. Materials of the middle group by grain composition (2–5 mm, screenings) can contain up to 2–3% coal in their composition and are most often represented by a mixture of mudstones, siltstones and sandstones with a predominance of one or another variety of rocks. Due to these features, the materials of the middle group are of the greatest interest as the main raw materials for the production of large-format high-void ceramic stones and bricks.

Keywords: wall ceramics, refuse heaps, technogenic raw materials, classification, coal.

For citation: Yavruyan Kh.S., Kotlyar V.D., Gaishun E.S., Gaishun A.S. General characteristics of the refuse heaps of Eastern Donbass and products of their processing as raw materials for the production of wall ceramics. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 12, pp. 23–27. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-23-27>

Поиск новых сырьевых источников для производства изделий стеновой керамики на Юге России является весьма актуальной задачей. Традиционное сырье – суглинки является с каждым годом все менее доступным. Дело в том, что суглинки являются почвообразующими породами и, как правило, над хорошими суглинками находятся и хорошие черноземы. Стоимость земель в последние годы в Ростовской области выросла в несколько раз. Также весьма проблематичным стал перевод сельскохозяйственных земель в земли промышленного назначения. Поэтому поиск нового, желательного нетрадици-

онного техногенного сырья для производства стеновой керамики является на Юге России весьма актуальной задачей.

Характерная черта пейзажа Восточного Донбасса и Донбасса в целом – наличие террикоников, являющихся породными отвалами угольных шахт. Внешне первоначально они представляют собой конусообразные и гораздо реже хребтовые насыпи (террикон – коническая насыпь, *фр.*) высотой до 100 м с углами откосов около 40° темно-серого (неперегоревшие терриконики) или красновато-серого цвета (полностью или частично перегоревшие терриконики).

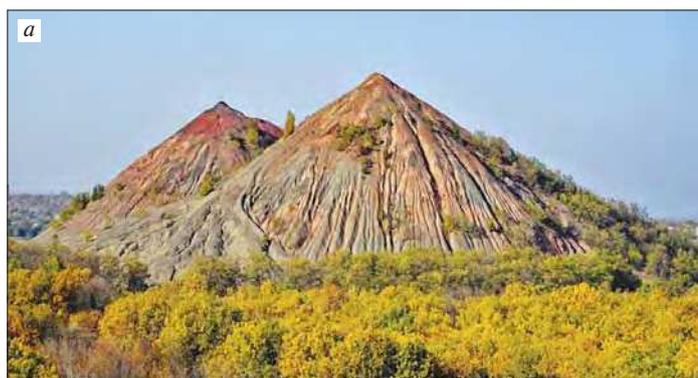


Рис. 1. Внешний вид неперегоревших (а) и перегоревших (b) первичных неразрабатываемых терриконов
 Fig. 1. Appearance of non-burnt (a) and burnt (b) primary non-developed terriconics

ки). Возвышаясь над степными просторами, они вызывают непровольный интерес (рис. 1).

За почти 150-летний активный период угледобычи в Восточном Донбассе пройдено более двухсот шахтных стволов, сформировано около пятисот отвалов шахт и обогатительных фабрик. Общий объем отходов составляет около 700 млн т. Под хранилища углепромышленных отходов отведено сотни гектаров, а общая площадь нарушенных земель в несколько раз больше. Количество углепромышленных отходов, несмотря на предпринимаемые в последние годы меры, постепенно возрастает [1–3]. По объемам слагающих пород шахтные терриконы и отвалы обогатительных фабрик Восточного Донбасса классифицируются на четыре группы:

- очень мелкие – до 200 тыс. т;
- мелкие – 200–1100 тыс. т;
- средние – 1100–4000 тыс. т;
- крупные – более 4000 тыс. т.

По данным многолетних работ ВНИГРИУголь и обследований авторов, размерность кусков, слагающих отвалы угольных шахт Восточного Донбасса, колеблется в широких пределах (табл. 1). Кроме того, при формировании отвалов всегда наблюдается естественная сегрегация, поэтому их строение достаточно сложное и четко просматривается зональность в распределении обломков пород по размерам: более крупные куски пород наблюдаются у подошвы терриконов, а вверх по склону размеры кусков и частиц уменьшаются.

Таблица 1
 Table 1

Фракционный состав отвалов угольных шахт Восточного Донбасса
 Fractional composition of coal mines of East Donbass

Размер фракций, мм	Содержание фракций в объеме отвалов, %	
	Среднее	Пределы колебаний
0–6	12,8	2–70
6–50	23,9	3–60
50–70	22,1	2–50
70–100	21,3	3–50
100–450	14,5	0–76
Более 450	5,4	0–32

По литологическому составу терриконики, образовавшиеся в результате добычи угля, и отвалы обогащения углей сложены углевмещающими породами и частями угля [4]. Основными углевмещающими породами Восточного Донбасса являются песчаники, аргиллиты, известняки. Преобладающими являются песчаники с алевролитами и аргиллиты и их различные разновидности (рис. 2). В зависимости от района, возраста углевмещающих свит и индексов угольных пластов работами ВНИГРИУголь выделены следующие преобладающие литологические составы пород отвалов:

- известково-песчано-глинистые (аргиллитовые);
- песчано-глинистые(аргиллитовые);
- песчанистые;
- глинистые (аргиллитовые).

Это укрупненная классификация. Однако если рассматривать угольные отвалы как техногенную сырьевую базу для стройиндустрии, требуется более детальная, основанная на вещественном составе и свойствах классификация.

Содержание угля в отвалах шахт составляет до 10%, в отвалах обогатительных фабрик – угольных шламов, обычно больше – 10–20%. Такое количество угля предопределяет их склонность к самовозгоранию. Причины самовозгорания детально изучены и освещены в работах А. Айруни, В. Меркулова, П. Леонова, Б. Сургачева и других ученых [4]. Общим выводом работ этих ученых является то, что очаги горения в объеме отвалов располагаются неравномерно и незаконномерно. Горелые отвалы в их общем объеме Восточного Донбасса составляют 50–70%, однако большая часть из них – это частично перегоревшие отвалы с различной степенью термической изменчивости пород. Также часто в отвалах присутствуют участки неперегоревших и нагретых без доступа воздуха пород.

Минеральный состав пород, слагающих отвалы угольных шахт и обогатительных фабрик, обусловлен генезисом исходных пород и последующими процессами экзогенных преобразований. Для песчаников и алевролитов характерными минеральными ассоциациями являются: кварц, полевые шпаты (часто измененные), слюды, хлорит. Для аргиллитов – каолинит, гидрослюды, слюды (часто пелитизированные), кварц, хлорит. Для известняков основным



Рис. 2. Терриконик, сложенный преимущественно глинистыми сланцами (а) и песчано-глинистыми породами (b)
Fig. 2. Terriconics, composed mainly of clay shales (a) and sandy-clay rocks (b)

минералом, естественно, является кальцит. Во всех отвалах в том или ином количестве присутствует уголь, который встречается как в отдельных кусочках, так и в сростках с различными породами, но чаще с аргиллитами и алевролитами.

Химический состав негорелых отвалов шахт и обогатительных фабрик непосредственно зависит от минерального. Усредненный химический состав песчаников (алевролитов), аргиллитов и отходов углеобогащения приведен в табл. 2.

Для перегоревших отвалов характерно полное отсутствие и меньшее количество угольной составляющей, а также минеральные изменения, вызванные высокой температурой глинистых минералов.

Как видно, углепромышленные отходы отличаются большим разнообразием по минеральному составу, что являлось серьезным сдерживающим фактором для их промышленного освоения. Долгое время терриконики оставались нетронутыми, оказывая неблагоприятное воздействие на почву, атмосферу, подземные и поверхностные воды [5]. Часто неблагоприятное воздействие террикоников на окружающую среду является преувеличенным, но тем не менее оксид серы, выделяющийся из терриконов, образует серную кислоту, которая с дождями попадает на поверхность близлежащих земель. Многие из терриконов медленно тлеют, выделяя в атмосферу оксиды углерода, азота, а также в небольшом количестве сероводород и другие продукты горения. Поверхностные и подземные воды при контакте с террикониками становятся слабокислыми, из прес-

ных и слабосоленых превращаются в соленые с повышенной минерализацией.

Однако в последние годы ситуация по отношению к негорелым терриконикам Восточного Донбасса как объектам промышленного освоения коренным образом изменилась. В результате экономических преобразований в стране, происходящих в последние десятилетия, стало экономически более выгодным извлекать уголь, находящийся в отвалах, чем строить новые шахты (Угольная промышленность. Горная энциклопедия. URL: <http://www.mining-enc.ru/u/ugolnaya-promyshlennost> (дата обращения: 10.08.2020)). Этот процесс был активно запущен примерно с 2010 г. Углепромышленные отходы входят в перечень общераспространенных полезных ископаемых по Ростовской области как техногенное сырье – горелые породы терриконов, отходы угледобычи и углеобогащения для строительных и дорожно-строительных работ. Для их разработки требуются лицензии, проекты разработки и другие нормативно-разрешительные документы. Основной задачей недропользователей данного техногенного сырья является извлечение угля, хотя для многих терриконов доходы от реализации извлеченного угля и доходы от реализации щебня для строительных и дорожных работ сопоставимы. Поэтому в настоящее время разрабатываются терриконики, где основными составляющими являются песчаники и алевролиты [6].

Процесс переработки терриконов для извлечения угля и получения материалов для строительных и дорожно-строительных работ принципиально не от-

Таблица 2
Table 2

Усредненный химический состав негорелых пород отвалов шахт и обогатительных фабрик, мас. %
Average chemical composition of non-burnt rocks of mine dumps and concentration plants, % by weight

Вид породы	ППП	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ общ.	CaO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	C _{орг}
Песчаники	4–7	60–72	14–20	3–6	1–3	0,1–0,5	0,5–2,5	0,5–1	1–2
Алевролиты	5–8	58–68	16–22	3–6	2–4	0,2–0,6	0,8–2,8	1–1,5	1–3
Аргиллиты	6–9	52–60	16–24	3–6	1–3	0,4–0,8	2–4	1–2	1–3
Известняки	30–42	1–4	1–2	0,5–1	40–55	0,1–0,3	0,2–0,4	0,1–0,2	0,5–1
Отходы углеобогащения	15–35	45–60	12–16	3–6	1–4	0,5–1,5	1–3	0,5–1	10–30

личается от технологий традиционного обогащения угля, но дополняется технологическими элементами получения щебня различных фракций (<https://nerudr.ru/blog/shcheben/shcheben-processyproizvodstva/> Щебень: процессы производства). В процессе переработки негорелых терриконов помимо угля на различных стадиях технологического процесса образуются материалы, которые авторами классифицированы по фракционному составу, минералого-петрографическому составу и содержанию угля [7–11].

По фракционному составу условно выделили пять групп:

- очень крупные (ОК) – материалы с размером зерен кусков свыше 150 мм (бутовый камень);
- крупные (К) – материалы с размером зерен от 5 до 150 мм (щебень);
- средние (С) – с размером зерен от 2 до 5 мм (средний и крупный песок);
- мелкие (М) – с размером зерен от 0,5 до 2 мм (угольный кек, мелкий песок);
- тонкие (Т) – с размером зерен менее 0,5 мм (угольные шламы, пылевато-песчаная фракция).

Минералого-петрографический состав материалов, получаемых в результате переработки терриконов, обусловленный исходным составом отвалов, авторы условно разделили на четыре группы:

- I группа – материалы, где основными породами, являются аргиллитоподобные глины, аргиллиты и глинистые сланцы;
- II группа – материалы, где основными слагающими породами являются песчаники и алевролиты;
- III группа – мешанные материалы, где наблюдается наличие пород и второй и первой групп;
- IV группа – материалы, где отмечается присутствие известняков.

По содержанию угля получаемые материалы также условно разделяются на четыре группы по мере возрастания содержания угля:

- безуглистые материалы (БУ) – содержание угля не превышает 1%;
- с низким содержанием угля (НУ) – содержание угля находится в пределах от 1 до 10%;
- со средним содержанием угля (СУ) – содержание угля находится в пределах от 10 до 25%;
- с высоким содержанием угля (ВУ) – содержание угля составляет более 25%.

Крупные и очень крупные материалы переработки терриконов с размером зерен более 5 мм практически не содержат угля и востребованы в строительстве и дорожном строительстве для отсыпки и строительства дорог, обратной засыпки, как заполнители бетонов, сухих смесей и т. д. Они подвергаются рассеву по ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» и ГОСТ 32703–2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Технические условия». Представлены они обычно относительно прочными песчаниками и алевролитами, так как более слабые породы (аргиллитоподобные

глины, аргиллиты и глинистые сланцы), если они даже есть в исходной массе, в результате многократного дробления и отсева уходят во фракции менее 5 мм. Эта группа пород даже при тонком измельчении не дает пластичного теста и не обладает связующей способностью. В силу этих и других особенностей они не представляют интереса для производства изделий стеновой керамики.

Материалы средней группы по зерновому составу (2–5 мм, отсева) могут содержать до 2–3% угля и чаще всего представлены смесью аргиллитов, алевролитов и песчаников с преобладанием той или иной разновидности пород. Они, как правило, при тонком измельчении обладают небольшой связностью и дают малопластичное тесто. Если в исходном составе присутствуют аргиллитоподобные глины, то они могут при измельчении быть и умеренопластичными. Материалы средней группы являются маловостребованными и накапливаются в отдельных отвалах. Предприятиям приходится нести затраты по их содержанию. В силу этих особенностей материалы средней группы представляют наибольший интерес как основное сырье для производства крупноформатных высокопустотных керамических камней и кирпича.

Мелкие и тонкие материалы содержат уголь в среднем 15–30% и за счет этого не могут рассматриваться как основное сырье для производства керамических камней. Количество угля, необходимое для самообжига изделий, составляет 8%. Тонкие материалы (угольные шламы) являются маловостребованными и помимо угля чаще всего содержат глинистые минералы, за счет чего обладают пластичностью и связностью и могут рассматриваться как комплексная добавка при производстве изделий стеновой керамики. Мелкие материалы по самым последним тенденциям будут подвергаться дополнительной переработке с целью извлечения угля и также могут потенциально рассматриваться как сырье для производства изделий стеновой керамики, хотя и обладают малой связностью и пластичностью.

Если в материалах тонкой, мелкой и средней групп присутствует известняк, что бывает достаточно редко для угольных отвалов, то они считаются малоприспособным сырьем, так как в процессе подготовки сырьевых масс требуют тонкого измельчения – менее 0,1–0,5 мм.

Учитывая вышеприведенные данные, а также экономические факторы, главными из которых являются минимальная стоимость сырьевых материалов и практически полное отсутствие затрат на обжиг за счет содержащегося угля, материалы средне-, мелко- и тонкозернистые являются перспективным сырьем для получения крупноформатных высокопустотных керамических камней и рядового кирпича с минимальной себестоимостью. Однако для реализации этого плана необходимо решить ряд научно-практических задач, связанных с разработкой методов испытаний данного техногенного сырья, подбором составов сырьевых масс, поиском оптимальной технологии производства, подбором оборудования и экологией производства.

Список литературы

1. Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Ростовской области. <http://www.doncomeco.ru>.
2. Явруян Х.С., Гайшун Е.С. Анализ состояния отходов угледобывающей промышленности и использования их в производстве керамических изделий // *Научное обозрение*. 2016. № 24. С. 40–46.
3. Kotlyar V., Yavruyan K. Thin issues products of processing waste heaps as raw materials for ceramic wall products. *MATEC Web of Conferences*. «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017». 2017. 0501. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712905013>
4. Коломенский Г.Ю., Гипич Л.В. Методика изучения и оценки пород, слагающих отвалы угледобывающих предприятий, как сырья для производства минеральных волокон. Ростов н/Д: ВНИГРИУголь, 1997. 30 с.
5. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». М.: Минприроды России: НПП «Кадастр», 2019. 844 с.
6. Бескопильный А.Н., Явруян Х.С., Гайшун Е.С., Котляр А.В., Гайшун А.С. Высокоэффективные керамические камни из отсеков переработки терриконов Восточного Донбасса // *Строительные материалы*. 2020. № 8. С. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-783-8-16-21> <https://nerudr.ru/blog/shcheben/shcheben-processyproizvodstva/SHCHeben':processyproizvodstva>
7. Kotlyar V.D., Yavruyan K.S., Gaishun E.S., Teryokhina Y.V. Comprehensive approach to the processing of East Donbass Spoil Tip. *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference «Management of Municipal Waste as an Important Factor of Sustainable Urban Development» (WASTE'2018)*. October, 2018. St. Petersburg, pp. 22–24.
8. Котляр В.Д., Козлов А.В., Котляр А.В., Терехина Ю.В. Особенности камневидных глинистых пород Восточного Донбасса как сырья для производства стеновой керамики // *Вестник МГСУ*. 2014. № 10. С. 95–105.
9. Котляр А.В., Талпа Б.В., Лазарева Я.В. Особенности химического состава аргилитоподобных глин и аргиллитов // *Строительные материалы*. 2016. № 4. С. 10–13.
10. Yavruyan Kh.S., Kotlyar V.D., Gaishun E.S. Medium-fraction materials for processing of coal–thread waste drains for the production of wall ceramics. *Materials and Technologies in Construction and Architecture. Materials Science Forum Submitted*. 2018. Vol. 931, pp. 532–536.
11. Yavruyan Kh.S., Gaishun E.S., Kotlyar V.D., Okhotnaya A.S. Features of phase and mineralogical of conversions when burning wall ceramics on the basis of secondary materials for processing coal deposits of Eastern Donbass. *Materials and Technologies in Construction and Architecture II. Materials Science Forum. CATPID*. 2019. Vol. 974, pp. 67–74. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.67>

References

1. Oficial'nyj sajt Ministerstva prirodnyh resursov i ekologii Rostovskoj oblasti. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.doncomeco.ru>.
2. Yavruyan H.S., Gajshun E.S. Analysis of the state of waste from the coal mining industry and their use in the production of ceramic products. *Nauchnoe obozrenie*. 2016. No. 24, pp. 40–46. (In Russian).
3. Kotlyar V., Yavruyan K. Thin issues products of processing waste heaps as raw materials for ceramic wall products. *MATEC Web of Conferences*. “International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017”. 2017. 0501. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712905013>
4. Kolomensky G.Yu., Gipich L.V. Metodika izucheniya i otsenki porod, slagayushchikh otvaly ugledobvyayushchikh predpriyatiy, kak syr'ya dlya proizvodstva mineral'nykh volokon [Methods for studying and evaluating rocks that make up the dumps of coal mining enterprises as raw materials for the production of mineral fibers]. Rostov-on-Don: VNIGRIUgol. 1997. 30 p.
5. State report “On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2018”. Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia: NPP “Cadastre”, 2019. 844 p. 2019. (In Russian).
6. Beskopylny A.N., Yavruyan Kh.S., Gaishun E.S., Kotlyar A.V. Gaishun A.S. High–performance ceramic stones from waste disposal sites in Eastern Donbass. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 8, pp. 16–21. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-783-8-16-21>
7. Kotlyar V.D., Yavruyan K.S., Gaishun E.S., Teryokhina Y.V. Comprehensive approach to the processing of East Donbass Spoil Tip. *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference «Management of Municipal Waste as an Important Factor of Sustainable Urban Development» (WASTE'2018)*. October, 2018. St. Petersburg, pp. 22–24.
8. Kotlyar V.D., Kozlov A.V., Kotlyar A.V., Teryokhina Yu.V. Features of stone-like clayey rocks of the Eastern Donbass as raw materials for the production of wall ceramics. *Vestnik MGSU*. 2014. No. 10, pp. 95–105. (In Russian).
9. Kotlyar A.V., Talpa B.V., Lazareva Ya.V. Features of chemical compositions of argillite-like clays and argillites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 4, pp. 10–13. (In Russian).
10. Yavruyan Kh.S., Kotlyar V.D., Gaishun E.S. Medium-fraction materials for processing of coal–thread waste drains for the production of wall ceramics. *Materials and Technologies in Construction and Architecture. Materials Science Forum Submitted*. 2018. Vol. 931, pp. 532–536.
11. Yavruyan Kh.S., Gaishun E.S., Kotlyar V.D., Okhotnaya A.S. Features of phase and mineralogical of conversions when burning wall ceramics on the basis of secondary materials for processing coal deposits of Eastern Donbass. *Materials and Technologies in Construction and Architecture II. Materials Science Forum. CATPID*. 2019. Vol. 974, pp. 67–74. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.67>

В.А. ГУРЬЕВА, д-р техн. наук (victoria-gurieva@rambler.ru),
А.В. ДОРОШИН, инженер (аспирант), А.А. ИЛЬИНА, инженер (аспирант)

Оренбургский государственный университет (460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13)

Модифицированные золошлаковые отходы в производстве керамического кирпича полусухого прессования

Представлены результаты экспериментальных исследований вторичного использования золошлаковых отходов ТЭЦ в композиции с глинистым алюмосиликатным сырьем Новосергиевского месторождения при производстве стеновой керамики методом двухосного полусухого прессования. Приведены данные о ежегодной добыче угля и образованию золошлакоотвалов, которые по удельной эффективной активности естественных радионуклидов относятся к первому классу и могут использоваться без ограничений. Определены физико-механические зависимости состава шихты суглинок/ЗШО, такие как предел прочности при сжатии, средняя плотность, водопоглощение. Выявлена целесообразность ввода силикагеля в количестве 11%. С помощью рентгенофазового анализа определены новообразования анортито- и волластанитоподобных кристаллических фаз. Данные исследования позволяют получать керамический кирпич формата 1НФ с маркой по прочности М150–175, средней плотностью 1620–1790 кг/м³.

Ключевые слова: алюмосиликатное сырье, суглинок, золошлаковые отходы, метод полусухого прессования, керамический кирпич, силикагель.

Для цитирования: Гурьева В.А., Дорошин А.В., Ильина А.А. Модифицированные золошлаковые отходы в производстве керамического кирпича полусухого прессования // *Строительные материалы*. 2021. № 12. С. 28–33.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-28-33>

V.A. GUR'eva, Doctor of Sciences (Engineering) (Victoria-gurieva@rambler.ru),
A.V. DOROSHIN, Engineer (Graduate Student), A.A. IL'INA, Engineer (Graduate Student)
Orenburg State University (13, Pobedy Avenue, Orenburg, 460018, Russian Federation)

Modified Ash and Slag Waste in the Production of Semi-Dry Pressed Ceramic Bricks

The results of experimental studies of the secondary use of ash and slag waste from the CHP in a composition with clay aluminosilicate raw materials of the Novosergievskoye deposit in the production of wall ceramics by biaxial semi-dry pressing are presented. The data on the annual coal mining and the formation of ash and slag dumps are presented, which, according to the specific effective activity of natural radionuclides, belong to the first class and can be used without restrictions. The physico-mechanical dependences of the composition of the charge: loam/ASW such as: compressive strength, average density, water absorption are determined. The expediency of introducing silica gel in an amount of 11% was revealed. Using X-ray phase analysis, neoplasms of anorthite- and volostanite-like crystalline phases were determined. These studies make it possible to obtain a 1NF ceramic brick with a strength grade of M150–175, with an average density of 1620–1790 kg/m³.

Keywords: aluminosilicate raw materials, loam, ash and slag waste, semi-dry pressing method, ceramic brick, silica gel.

For citation: Gur'eva V.A., Doroshin A.V., Il'ina A.A. Modified ash and slag waste in the production of semi-dry pressed ceramic bricks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 12, pp. 28–33. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-28-33>

При производстве обжиговых строительных материалов в России часто сталкиваются с проблемой некачественного глинистого сырья, что приводит к дефициту выпускаемой продукции, а это обуславливает снижение объемов строительства.

Для организации нового производства или модернизации существующих технологий керамического кирпича необходимо изучить химико-минералогический состав глин базового месторождения. Это позволяет определить их область применения согласно ГОСТ 9169–75 «Сырье глинистое для керамической промышленности. Классификация» и осуществить выбор технологии изготовления изделий. Местные месторождения глины характеризуются различными технологическими показателями, которые ограничивают номенклатуру выпускаемого кирпича, цветовую палитру и определяют физико-механические показатели, существенно отличающиеся от требований нормативных документов. Для решения данной проблемы необходимо комплексное изучение глины, при необходимости замена технологии на

более совершенные способы производства, корректировка состава шихты и исследование влияния модифицирующих добавок в композиции с глинистым сырьем.

Одним из видов модифицирующей добавки для получения качественной конкурентоспособной строительной керамики являются золошлаковые отходы ТЭЦ (далее – ЗШО). По результатам [1] себестоимость готовой продукции с применением данного вида отходов снижается от 15 до 30%.

По статистике в России каждый год образуется примерно 25–30 млн т золошлаковых отходов [2]. Согласно данным Министерства энергетики, за последние 10 лет добыча угля в России увеличилась в 1,3 раза и составляет 440 млн т/г (Распоряжение Правительства Российской Федерации «Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года» от 13.06.2020 № 1582-р). Увеличение добычи и потребления угля неизбежно приведет к образованию новых золошлакоотвалов и усилению их негативного воздействия на экологию.

Химический состав суглинков и ЗШО Chemical composition of loam and ASW

Название месторождения	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	ППП	Σ
	Содержание, %									
Новосергиевское	60,66	0,84	9,82	4,78	1,59	1,95	3,54	7,56	9,26	100
ЗШО	32,78	0,48	9,86	4,15	0,31	0,94	1,24	3,75	46,49	100

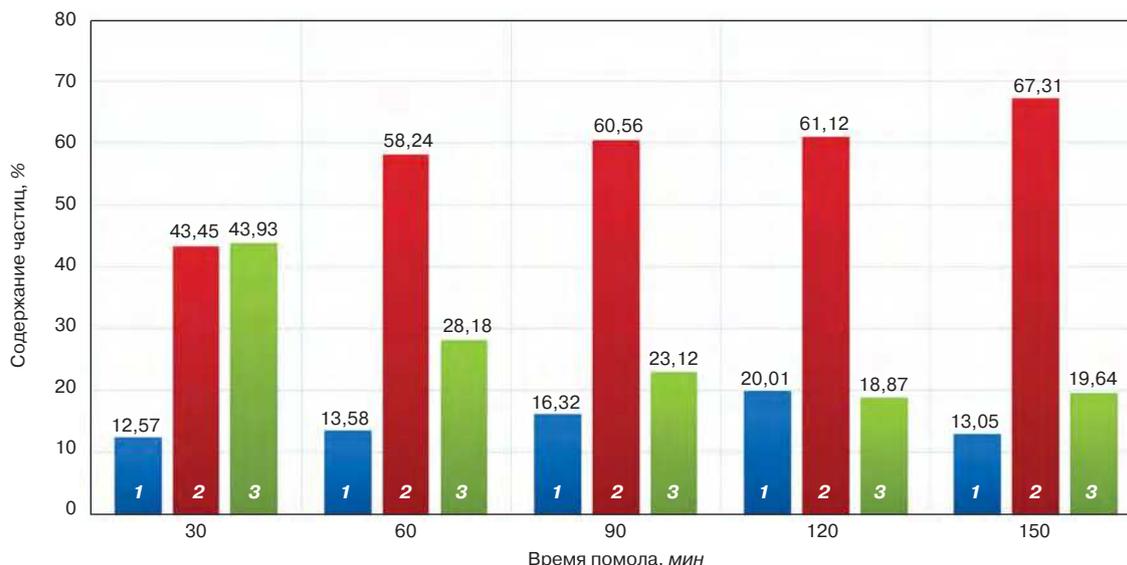


Рис. 1. Изменение гранулометрического состава шихты, %: суглинок Новосергиевского месторождения (72) и ЗШО (28) в зависимости от продолжительности помола: 1 – глинистые частицы (> 0,005 мм), %; 2 – пылеватые частицы (0,005–0,05 мм), %; 3 – песчаные частицы (0,05–1 мм), %

Fig. 1. Change in the granulometric composition of the charge, %: loam of the Novosergievskoye deposit (72) and ASW (28) depending on the duration of grinding: 1 – clay particles (> 0,005 mm), %; 2 – dusty particles (0,005–0,05 mm), %; 3 – sand particles (0,05–1 mm), %

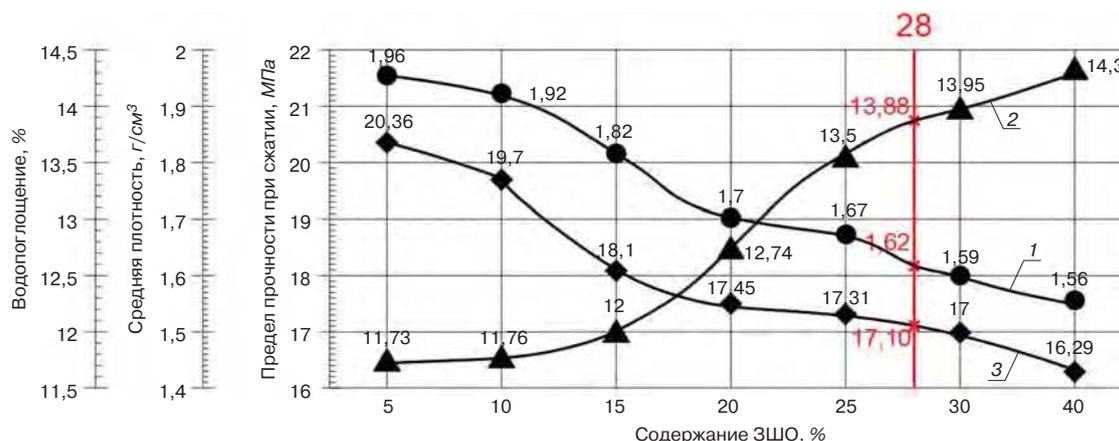


Рис. 2. Физико-механические свойства изделий, обожженных при температуре 1150°C в зависимости от содержания в двухкомпонентной шихте ЗШО: 1 – средняя плотность, г/см³; 2 – водопоглощение, %; 3 – предел прочности при сжатии, МПа

Fig. 2. Physical and mechanical properties of products fired at a temperature of 1150°C, depending on the content in the 2-component charge of ASW: 1 – average density, g/cm³; 2 – water absorption, %; 3 – compressive strength, MPa

На протяжении нескольких десятков лет российскими и зарубежными учеными проводятся исследования по применению ЗШО в качестве вторичного сырья для производства различных строительных материалов [3–7]. Полученные результаты свидетельствуют о возможном применении ЗШО в качестве модифицирующей добавки в керамическом производстве, однако полученные изделия характеризуются более низкими показателями по сравнению с изделиями, полученными из традиционного

сырья. Это ограничивает практическую область применения ЗШО.

Авторами статьи в качестве традиционного сырья использовались легкие суглинки Бузулукского и Новосергиевского месторождения. Пробы золошлаковых отходов отобраны с отвалов ТЭЦ № 1 г. Орск (Оренбургская обл.), которые представлены отходом, образовавшимся в топках со слоевым сжиганием небогатенного угля марки ДГ при температуре 1700–1900°. Согласно проведенным исследованиям

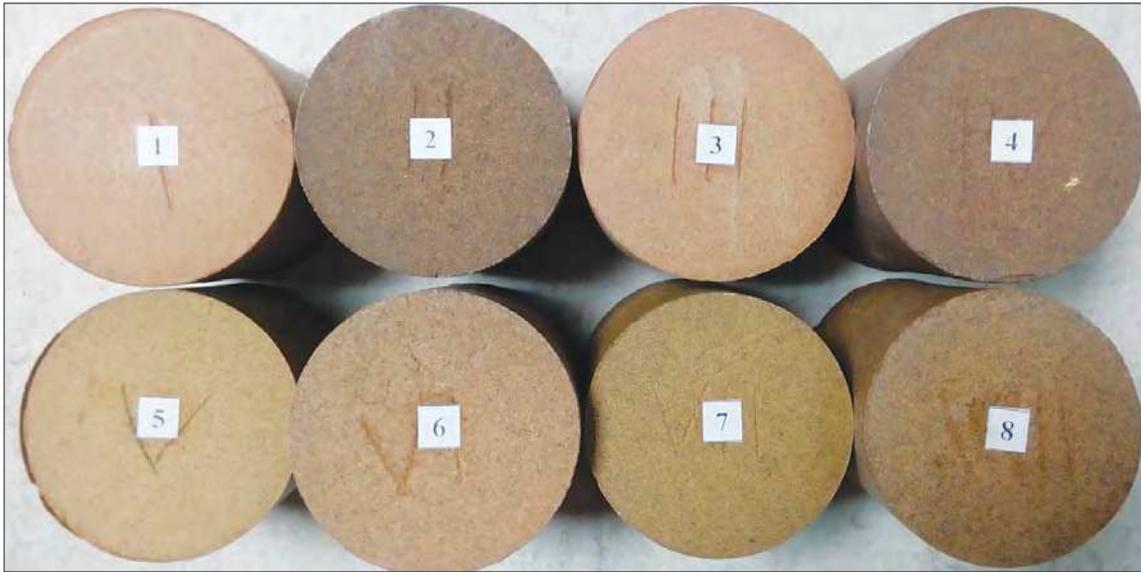


Рис. 3. Изменение цветовой палитры в зависимости от содержания ЗШО от 5 до 40% в керамической шихте
 Fig. 3. Changing the color palette depending on the ASW content from 5 to 40% in the ceramic batch

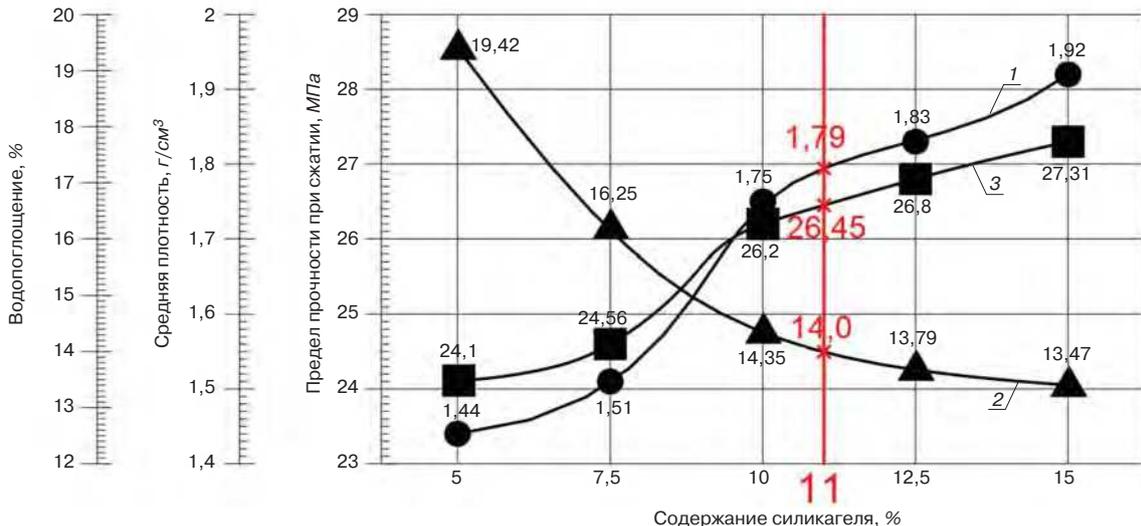


Рис. 4. Физико-механические свойства изделий состава: суглинок 54% + ЗШО 35% + силикагель 11%, обожженных при температуре 1050°C: 1 – средняя плотность, г/см³; 2 – водопоглощение, %; 3 – предел прочности при сжатии, МПа
 Fig. 4. Physical and mechanical properties of products of the composition: loam 54% + ASW 35% + silica gel 11%, fired at a temperature of 1050°C: 1 – average density, g/cm³; 2 – water absorption, %; 3 – compressive strength, MPa

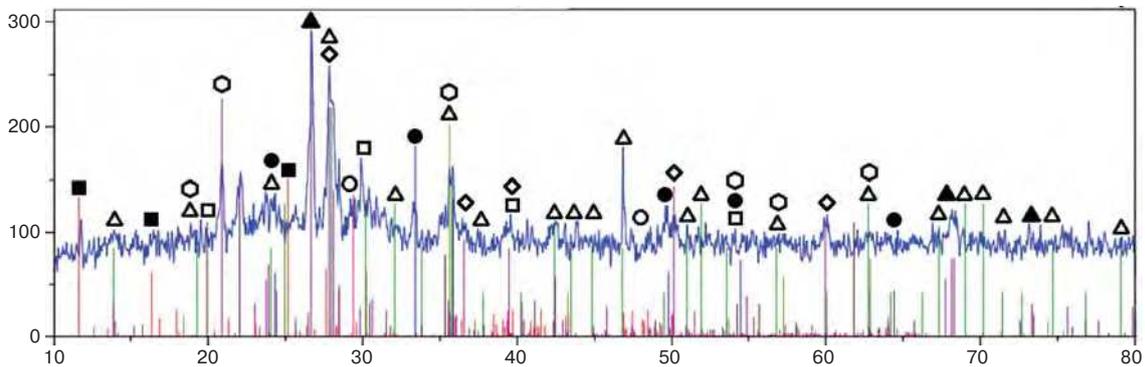


Рис. 5. Рентгенограмма обожженных при t=1050°C образцов, полученных на основе с 2-х компонентной шихтой состава: суглинок Новосергиевского месторождения 54% + ЗШО 35% с добавкой силикагеля 11%: ■ – волластонит; □ – монтмориллонит; ▲ – кварц; △ – анортит; ● – оксид железа; ○ – кальцит; ◆ – оксид алюминия; ◇ – альбит
 Fig. 5. X-ray image of samples fired at t=1050°C, obtained on the basis of a 2-component charge of the composition: loam of the Novosergievskoye deposit 54% + ASW 35% with the addition of silica gel 11%: ■ – wollastonite; □ – montmorillonite; ▲ – quartz; △ – anorthite; ● – iron oxide; ○ – calcite; ◆ – aluminum oxide; ◇ – albite

по радиационной активности (ГОСТ 30108–94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов»), ЗШО относятся к I классу с суммарной удельной активностью естественных радионуклидов $A_{эфф}=58,54$ Бк/кг, что позволяет их использовать без ограничений.

Химический состав суглинков и ЗШО представлен в таблице. Минералогический состав суглинков представлен следующими минералами: кварц – 48,4%, кальцит – 6,6%, альбит – 9,2; мусковит – 4,5; каолинит – 7,1; иллит-монтмориллонит – 6,3; ортоклаз – 4; пирит – 0,9; иллит – 0,8; клинохлор – 5,3; монтмориллонит – 6,6; ильменит – 0,3. Это позволяет отнести суглинок к глинистому сырью смешанно-слоистого минералогического состава.

Из таблицы следует, что суглинки характеризуются оптимальным для производства керамики согласно [8] химическим составом с умеренным содержанием карбонатных включений. Содержание Al_2O_3 в диапазоне 8–28% [8] позволяет предположить, что при обжиге глинозем вступит в реакцию с кремнеземом и приведет к образованию муллитоподобных соединений. Снижению температуры начала данных процессов способствует оксид железа суглинка и ЗШО 4,15–4,78%, который в композиции со щелочными и щелочно-земельными оксидами продуктов распада исходного сырья активизирует образование первоначального расплава, а в дальнейшем кристаллизацию из него комплексных кристаллических соединений, в том числе муллитоподобных. По температуре плавления 1150–1170° суглинки относятся к группе легкоплавкого сырья.

На первом этапе исследований проведена сушка сырья в сушильном шкафу при температуре 80° до воздушно-сухого состояния. Затем осуществлялся помол суглинка и ЗШО в планетарной мельнице до полного прохождения через сито № 018 мм [9].

На следующем этапе изготавливались образцы-цилиндры размером 50×50 мм методом полусухого прессования. Содержание ЗШО в двухкомпонентной шихте изменялось от 5 до 40%. Формовочная влажность шихты для образцов, изготовленных из суглинка с добавкой ЗШО, составляла 10%. Прессование образцов принято по заводской методике двухступенчатое с $P_{max}=25$ МПа. Перед обжигом образцы высушивались в сушильном шкафу до влажности 4% при температуре 100–105°. Температура обжига изменялась от 800 до 1200°, опытным путем установлен оптимальный состав шихты: суглинок 72% + ЗШО 28%. Температура обжига 1150° [10].

В работе выполнено моделирование гранулометрического состава шихты на основе суглинка и ЗШО в зависимости от продолжительности помола (рис. 1).

При раздельном измельчении суглинка и ЗШО продолжительностью более 150 мин гранулометрический состав практически не изменялся за счет высокой прочности монокристаллических частиц малых размеров [11].

На рис. 2 приведены физико-механические свойства изделий, выполненные из композиции суглинка и ЗШО в пропорции, %: 72/28 после 120 мин помола.

В ходе анализа полученных результатов для определения оптимального состава шихты после помола в течение 120 мин приняты стандартные заводские показатели готовой продукции: водопоглощение 12–14% и плотность 1,6–1,9 г/см³. Добавка ЗШО к суглинку в количестве 28% позволяет получить изделие, характеризующееся водопоглощением 13,88%, средней плотностью 1,62 г/см³, $R_{сж}=17,1$ МПа. Однако при сравнении полученных результатов с физико-механическими показателями образцов из чистого суглинка (водопоглощение – 13,2%, средняя плотность – 1,88 г/см³, $R_{сж} – 23,49$ МПа) становится очевидно, что ввод ЗШО в массу суглинка приводит к снижению технических свойств: $R_{сж} – 27%$, средняя плотность – 13,8% и увеличению водопоглощения – 4,9%.

В ходе исследований отмечено положительное влияние на форму образцов увеличения содержания тонкодисперсных частиц ЗШО (диаметром 0,005–0,05 мм) в количестве до 61%: четкие грани, отсутствие трещин и сколов за счет более плотной упаковки шихты (рис. 3).

С целью моделирования структуры и физико-механических свойств изделий состава суглинок + ЗШО принято решение о вводе в состав шихты дополнительного плавня в виде силикагеля из натриевой силикат-глыбы с кремнеземистым модулем 2,8–2,95. В ходе эксперимента определено оптимальное количество вводимого в состав шихты силикагеля – 11%. Измельчение производилось совместно с ЗШО в течение 120 мин. На рис. 3 представлены физико-механические свойства изделий в зависимости от введенного количества силикагеля.

По результатам проведенных исследований (рис. 4) установлено, что добавка силикагеля в количестве от 5 до 15% положительно влияет на прочностные показатели готовой продукции. Ввод 11% силикагеля в двухкомпонентную массу увеличивает предел прочности при сжатии на 35,4%, средней плотности на 9,5%, водопоглощение снижается на 0,9%. При этом становится возможным увеличение количества вводимого ЗШО с 28 до 35%, а также снижение температуры обжига на 100° до 1050°. Изделия с увеличенным содержанием ЗШО исследованы методом РФА и установлен их минеральный состав (рис. 5).

Проведенный РФА (рис. 5) позволил установить в составе керамических образцов синтезированные анортито- и волластанитоподобные кристаллические образования.

Таким образом, в ходе исследований установлено:

1) увеличение продолжительности помола сырьевых компонентов – суглинка и ЗШО в количестве 28% более 120 мин нецелесообразно, так как приводит к снижению количества глинистых частиц и росту содержания пылеватых и песчаных;

2) ввод 11% силикагеля позволяет увеличить количество ЗШО в шихте до 35%, снизить температуру обжига на 100° до 1050°;

3) в структуре синтезированного керамического камня в результате жидкофазного спекания формируются

новые кристаллические образования в виде анортито- и волластонитоподобных соединений, которые обеспечивают получение керамического кирпича марок М125–150 в соответствии с ГОСТ 530–2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия».

Список литературы

1. Ибрагимов Э. Зола и шлак ТЭС – перспективное вторичное сырье // *Энергетика и промышленность России*. 2021. № 13–14 (417–418).
2. Шубов Л.Я., Скобелев Д.О., Загорская Д.А. Вторичные ресурсы, образующиеся в сфере теплоэнергетики // *Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий*. М.; СПб.: Центр экологической промышленной политики, 2019. С. 649–670.
3. Волокитин О.Г. Физико-химические исследования материалов при получении минеральных волокон из техногенных отходов по плазменной технологии // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2009. № 4 (25). С. 100–107.
4. Макаренко С.В., Васильев К.О., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Производство зольной строительной керамики на основе золошлаковых отходов ТЭЦ Иркутской области – пример наилучшей доступной технологии их утилизации // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. № 4 (54). С. 54–61.
5. Кузнецова Г.В. Гранулометрический состав мелкодисперсных золоотходов и его влияние на свойства прессованных изделий // *Строительные материалы*. 2016. № 11. С. 51–56.
6. Котляр В.Д., Козлов А.В., Животков О.И., Козлов Г.А. Силикатный кирпич на основе зольных микросфер и извести // *Строительные материалы*. 2018. № 9. С. 17–21. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-763-9-17-21>
7. Гурьева В.А., Дорошин А.В., Ильина А.А. Математическая оптимизация составов шихт при производстве керамического кирпича // *Строительные материалы*. 2020. № 3. С. 64–68. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-779-3-64-68>
8. Августиник А.И., Керамика. Л.: Стройиздат, 1975. 592 с.
9. Прокофьев В.Ю., Гордина Н.Е. Процессы измельчения и механохимической активации в технологии оксидной керамики (обзор) // *Стекло и керамика*. 2012. № 2. С. 29–34.
10. Guryeva V.A., Doroshin A.V. The press powder technological parameters optimization in wall ceramics production by the semi-dry pressing method. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 974 MSF, pp. 419–423. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.974.419](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.419)
11. Бакунов В.С., Лукин Е.С. Особенности технологии высокоплотной технической керамики. Спекание оксидной керамики // *Стекло и керамика*. 2008. № 12. С. 19–23.

References

1. Ibragimov E. Ash and slag of thermal power plants – promising secondary raw materials. *Energy and industry of Russia*. 2021. No. 13–14 (417–418). (In Russian).
2. Shubov L.Ya., Skobelev D.O., Zagorskaya D.A. Secondary resources formed in the field of thermal power engineering. *Encyclopedia of Technologies. Evolution and comparative analysis of resource efficiency of industrial technologies*. Moscow, St. Petersburg: Center for Environmental Industrial Policy. 2019, pp. 649–670. (In Russian).
3. Volokitin O.G. Physico-chemical studies of materials in the production of mineral fibers from technogenic waste in plasma technology. *Vestnik of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2009. No. 4 (25), pp. 100–107. (In Russian).
4. Makarenko S.V., Vasiliev K.O., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. Production of ash construction ceramics based on ash and slag waste from the Irkutsk region thermal power plant - an example of the best available recycling technology. *Izvestia of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2020. No. 4 (54), pp. 54–61. (In Russian).
5. Kuznetsova G.V. Granulometric composition of fine ash waste and its influence on the properties of pressed products. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 11, pp. 51–56. (In Russian).
6. Kotlyar V.D., Kozlov A.V., Zhivotkov O.I., Kozlov G.A. Calcium-silicate brick on the basis of microspheres and lime. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 9, pp. 17–21. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-763-9-17-21> (In Russian).
7. Gur'eva V.A., Doroshin A.V., Il'ina A.A. Mathematical optimization of charge compositions in the production of ceramic bricks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 3, pp. 64–68. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-779-3-64-68>
8. Avgustinik A.I. *Keramika* [Ceramics]. Leningrad: Stroyizdat. 1975. 592 p.
9. Prokofiev V.Yu., Gordina N.N. Processes of grinding and mechanochemical activation in the technology of oxide ceramics (review). *Steklo i keramika*. 2012. No. 2, pp. 29–34. (In Russian).
10. Guryeva V.A., Doroshin A.V. The press powder technological parameters optimization in wall ceramics production by the semi-dry pressing method. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 974 MSF, pp. 419–423. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.974.419](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.419)
11. Bakunov V.S., Lukin E.S. Features of the technology of high-density technical ceramics. Sintering of oxide ceramics. *Steklo i keramika*. 2008. No. 12, pp. 19–23. (In Russian).



Комитет Торгово-промышленной палаты РФ
по предпринимательству в сфере строительства
АО «ЦНИИЭП жилища – институт комплексного проектирования
жилых и общественных зданий» (АО «ЦНИИЭП жилища»)
Объединенная редакция научно-технических журналов
«Жилищное строительство» и «Строительные материалы»®



XII Международная научно-практическая конференция «InterConPan-2022: индустриальное домостроение для комплексной застройки»

InterConPan-2022

International Conference of Large-panel Construction

5-6 Апреля 2022 г. / April 5-6, 2022

Белгород / Belgorod



ПРОГРАММА:

- 1-й день** Пленарное заседание
Секции: «Архитектура индустриальных зданий
и комплексное развитие территорий»;
«Инновационная технология предприятий
индустриального домостроения»
- 2-й день** Выездная сессия
АО «Завод ЖБК-1», Белгород
Объекты строительства:
Комплексная застройка ЖК «Новая Заря»
Коттеджная застройка

ТЕМАТИКА:

- Оборудование и технологии для модернизации предприятий индустриального домостроения
- Инновационные строительные системы
- BIM-технологии в сборном домостроении
- Современные бетоны, добавки и пигменты
- Архитектурно-планировочные решения
- Малоэтажное индустриальное строительство
- Решения фасадов и внутренней отделки
- Качественное и энергоэффективное индустриальное строительство
- Комплексное развитие территорий застройки

Постоянный спонсор

PROGRESS GROUP

Постоянный партнер

ALLBAU
software

Производственный партнер

ЖБК-1
БЕЛГОРОД

К проведению конференции готовятся тематические номера журналов «Жилищное строительство» № 3 и «Строительные материалы» № 3, в которых будут опубликованы основные пленарные и секционные доклады. Представление докладов в виде статей до 01.03.2022 г.

www.interconpan.ru

Организационный комитет: +7 (499) 976-20-36, 976-22-08

kpd-conf@mail.ru; mail@rifsm.ru www.rifsm.ru

Адрес для корреспонденции: 127434, Москва, Дмитровское ш., д. 9, стр. 3, оф. 408, редакция журнала «Жилищное строительство»

Научно-исследовательскому центру

95 лет



Крючков Виталий Геннадьевич,
генеральный директор, доктор экономических наук

АО «НИЦ «Строительство» – научно-технический лидер строительного комплекса России.

На протяжении 95 лет главной целью научной и производственной деятельности структурных подразделений АО «НИЦ «Строительство» является обеспечение надежности и безопасности как вновь возводимых строительных объектов, так и зданий и сооружений существующей застройки, а также контроля качества всего комплекса строительных работ.

Проводя комплексные работы по фундаментальным, поисковым и прикладным научным исследованиям, опытно-конструкторским разработкам в строительной отрасли, совершенствуя нормативную базу, АО «НИЦ «Строительство» по праву занимает лидирующую позицию в области строительных наук, успешно участвует в реализации мероприятий государственной программы Российской Федерации «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» и государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации».

Миссия АО «НИЦ «Строительство» – лидировать в изобретении, развитии и внедрении инновационных строительных материалов и технологий для обеспечения безопасности и комфорта среды жизнедеятельности людей.

АО «НИЦ «Строительство» призвано способствовать социальной стабильности, процветанию и прогрессу, обеспечивая безопасность и комфорт среды жизнедеятельности людей.

Научно-исследовательский центр «Строительство» является надежным и ответственным партнером, обеспечивая максимальную эффективность и безопасность строительства за счет профессионализма и инновационных решений.

Сотрудники АО «НИЦ «Строительство» являются его главным фундаментом, благодаря которому Центр с успехом выполняет поставленные задачи. Кадровая политика Центра направлена на создание условий для развития научного потенциала сотрудников, профессионального роста и совершенствования работы. Коллектив Центра сегодня – это 1000 сотрудников, из которых 32 доктора технических наук и 149 кандидатов технических наук. НИЦ «Строительство» имеет 19 собственных научных школ, таких как «Строительная механика, прочность и надежность сооружений», «Сейсмостойкость сооружений», «Противопожарные исследования», «Пожарная безопасность», «Динамика грунтов и сейсмостойкость фундаментов». Научные исследования и разработки в данных специфических областях являются важнейшим элементом в системе обеспечения комплексной безопасности высотных, уникальных и особо ответственных объектов, имеющих государственную важность.

В составе Научно-исследовательского центра успешно работают 47 узкоспециализированных отраслевых лабораторий, объединенных в три крупнейших широко известных в России и за рубежом научно-исследовательских института: Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В.А. Кучеренко (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко), Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона имени А.А. Гвоздева (НИИЖБ им. А.А. Гвоздева), Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений имени Н.М. Герсеванова (НИИОСП им. Н.М. Герсеванова).

Институты НИЦ «Строительство» не раз подтверждали высокий профессиональный статус, компетентность и активность в решении сложнейших задач отрасли. В их числе проблемы комплексного развития городов, территорий и объектов, разработка новых эффективных материалов и конструкций, освоение подземного пространства, создание и совершенствование нормативно-технической базы, диагностика, мониторинг и оценка фактического состояния зданий, сооружений и их конструкций. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки ведутся по ряду приоритетных направлений федерального уровня, в том числе: безопасность и противодействие терроризму; рациональное природопользование; энергетика и энергосбережение; переработка и утилизация техногенных образований и отходов; снижение риска аварий; уменьшение последствий природных и техногенных катастроф.



www.cstroy.ru
Тел.: +7 (495) 602-00-70
E-mail: inf@cstroy.ru
<https://www.facebook.com/cstroyru/>
инстаграм. [Nicstroy](https://www.instagram.com/nicstroy)



УДК 693.554.2

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-35-47>

И.Н. ТИХОНОВ¹, д-р техн. наук (nijhb_tikhonov@mail.ru);
И.В. КОПЫЛОВ², главный калибровщик (Igor.Kopylov@evraz.com)

¹ АО «НИЦ «Строительство» (109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6)

² АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (654043, г. Новокузнецк, Космическое ш., 16)

Эффективность производства и применения арматурного проката с новыми видами периодического профиля

На АО «ЕВРАЗ ЗСМК» произведены, в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» исследованы и внедрены в практику проектирования и строительства новые виды арматурного проката с многорядным расположением поперечных ребер на поверхности. Замена производства арматуры с «европейским» серповидным профилем, имеющим двухрядное расположение поперечных ребер по ГОСТ Р 52544–2006 «Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов А500С и В500С для армирования железобетонных конструкций. Технические условия», на арматуру с многорядным их расположением по ТУ 14-1-5526–2006 «Прокат арматурный класса А500СП с эффективным периодическим профилем. Технические условия» позволила: повысить стойкость калибров прокатных валков на 15–25%, а следовательно, увеличить производительность прокатных станов, снизить затраты на электроэнергию и топливо, уменьшить количество выбросов парникового газа; получить возможность проката с выдержкой минусовых допусков (ОМ2 по ГОСТ 34028–2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия») из-за отсутствия продольных ребер (Ав500П, Ав500СП и Ау500СП); обеспечить высокие браковочные значения критерия Рема ($f_R \geq 0,075$); обеспечить прокатку арматуры с возможностью ее многоцелевого использования при образовании двухзаходной винтовой резьбы (Ав500П); обеспечить конкурентные преимущества арматуры АО «ЕВРАЗ ЗСМК» на строительном рынке; получить экономический эффект в несколько сотен миллионов рублей от внедрения и производства на комбинате 4 млн т новой арматуры. В результате выполненных в 2003–2021 гг. исследований потребительских свойств арматуры с многорядным периодическим профилем классов А500СП, Ау500СП и А600СП в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» разработаны и внедрены для проектирования ЖБК СТО 36554501-005–2006 «Применение арматуры класса А500СП в железобетонных конструкциях» и СТО 36554501-065–2020 «Применение арматуры классов А500СП, Ау500СП и А600СП в железобетонных конструкциях», использование положений которых при расчете железобетонных конструкций позволяет уменьшить базовую длину анкеровки арматуры в бетоне на 12%; уменьшить расчетную ширину раскрытия трещин в железобетоне на 20–30%; снизить расход арматуры при производстве железобетонных конструкций в среднем на 2–3% из-за стабильного производства проката с минусовыми допусками; получить экономический эффект у потребителя в размере более 3 тыс. р./т. При годовом производстве стержневой арматуры в России около 4 млн т экономический эффект составит более 12 млрд р.

Ключевые слова: двухрядный профиль, многорядный профиль, стойкость калибров, минусовые допуски, критерий Рема, винтовая резьба, экономическая эффективность.

Для цитирования: Тихонов И.Н., Копылов И.В. Эффективность производства и применения арматурного проката с новыми видами периодического профиля // *Строительные материалы*. 2021. № 12. С. 35–47.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-35-47>

I.N. TIKHONOV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (nijhb_tikhonov@mail.ru); I.V. KOPYLOV², Chief Calibrator (Igor.Kopylov@evraz.com)

¹ JSC "SIC "Construction" (6, 2nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

² JSC "EVRAZ ZSMK" (16, Kosmicheskoe Shosse, Novokuznetsk, 654043, Russian Federation)

Efficiency of Production and Application of Rebar Rolled Products with New Types of Periodic Profile

New types of rebar rolled products with a multi-row arrangement of transverse ribs on the surface were produced at EVRAZ ZSMK JSC, and introduced into the practice of design and construction at the A.A. Gvozdev NIIZHB JSC "SIC "Construction". Replacement of the production of reinforcement with a "European" crescent-shaped profile having a two-row arrangement of transverse ribs according to GOST R 52544–2006 "Rolled reinforcement welded periodic profile of classes A500C and B500C for reinforcement of reinforced concrete structures. Technical conditions" for fittings with a multi-row arrangement according to TU 14-1-5526–2006 "A500SP class rebar rental with an effective periodic profile. Technical conditions" made it possible to increase the durability of rolling roll calibers by 15–25%, and consequently, to increase the productivity of rolling mills, reduce energy and fuel costs, and reduce greenhouse gas emissions; to get the possibility of rolling with exposure to minus tolerances (OM2 according to GOST 34028–2016 "Reinforcement rental for reinforced concrete structures. Technical conditions") due to the absence of longitudinal ribs (Av500SP and Au500SP); ensure high rejection values of the Rem criterion ($f_R \geq 0.075$); ensure rolling of the reinforcement with the possibility of its multi-purpose use when forming a two-way screw thread (Av500P); to provide competitive advantages of reinforcement of JSC "EVRAZ ZSMK" at the construction market; to get an economic effect of several hundred million rubles from the introduction and production of 4 million tons of new fittings at the plant. As a result of studies carried out in 2003–2021 of consumer properties of rebar with a multi-row periodic profile of classes А500SP, Ау500СП and А600СП in the A.A. Gvozdev NIIZHB, JSC "SIC "Construction" developed and implemented for the design of housing and communal services СТО 36554501-005–2006 "The use of А500SP class rebar in reinforced concrete structures" and СТО 36554501-065–2020 "Application of reinforcement of classes А500SP, Ау500СП and А600СП in reinforced concrete structures", using the positions of which in the calculation of reinforced concrete structures makes it possible to reduce the base length of anchoring reinforcement in concrete by 12%; reduce the crack opening width in reinforced concrete by 20–30%; reduce the consumption of reinforcement in the production of reinforced concrete structures on average by 2–3% due to stable production of rolled products with negative tolerances; to get an economic effect for the consumer in the amount of more than 3 thousand rubles / ton. With an annual production of rod fittings in Russia of about 4 million tons, the economic effect will be more than 12 billion rubles.

Keywords: double-row profile, multi-row profile, gauge stability, negative tolerances, Rem criterion, screw thread, economic efficiency.

For citation: Tikhonov I.N., Kopylov I.V. Efficiency of production and application of rebar rolled products with new types of periodic profile. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 12, pp. 35–47. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-35-47>

Арматурный прокат занимает первое место по объемам производства в списке продукции металлургической отрасли для строительства. Ежегодно в Российской Федерации производится свыше 7 млн т арматуры, что составляет примерно десятую часть от общего отечественного производства стали в 2020 г.

В последние годы доля РФ в мировом производстве стали снижается и составила 3,8% в 2019 г. Несмотря на столь скромные объемы производства, России пока еще удается сохранять пятое место по выпуску стали в мире после Китая, Индии, Японии и США. Как и в СССР до 1990-х гг., в настоящее время практически весь объем арматурного проката, произведенный в РФ, потребляется на внутреннем строительном рынке. Следовательно, его эффективность обуславливается технологическими требованиями металлургического производства, а применение в строительстве – требованиями действующих нормативных документов в России.

Приведенный ниже материал касается целесообразности совершенствования старых видов периодического профиля арматурного проката: «кольцевого», «серповидного» и эффективности внедрения его новых видов с многорядным расположением поперечных ребер.

С 1950 до 1990-х гг. в СССР производился в основном арматурный прокат по ГОСТ 5781–82 «Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия». Этот нормативный документ создавался на базе исследований потребительских свойств арматуры для использования в сборном строительстве из железобетона, приоритетном в СССР в то время. Одним из главных показателей являлось сцепление арматуры с бетоном, которое зависело от эффективности периодического профиля поверхности стержней.

Многочисленные исследования установили целесообразность массового применения в сборном железобетоне арматуры с кольцевой формой поперечных ребер [1, 2]. Такая арматура использовалась в опытах, по результатам которых были разработаны требования для проектирования железобетонных конструкций – СНиП 2.03.01–84 «Бетонные и железобетонные конструкции», наиболее прогрес-

сивные из действующих в мире, обеспечивающие высокие технико-экономические показатели строительства (рис. 1).

Однако кроме преимуществ кольцевого профиля по сцеплению с бетоном выявился ряд существенных недостатков при его производстве и применении:

- низкий предел выносливости арматуры в результате наличия очагов концентрации напряжений в местах пересечения продольных и поперечных ребер;
- сколы металла в местах входа резца в тело валька;
- быстрая изнашиваемость прокатных валков в узких местах калибров между поперечными канавками, выкрошка калибров в местах выхода поперечного ребра на продольное;
- большой разброс до 6% по погонной массе проката;
- потеря сцепления с бетоном после достижения в арматуре предела текучести (σ_T).

В связи с открытием границ и в результате снижения объемов строительства металлурги России в начале 1990-х гг. стали поставлять арматурный прокат за границу по зарубежным нормативным документам. В связи с вынужденной унификацией металлургического производства данная арматура стала массово поставляться для использования внутри России. Главным отличительным признаком зарубежной арматуры является вид ее периодического профиля. В отличие от арматуры с кольцевой формой поперечных ребер, принятой в СССР, европейская арматура, массово используемая как за рубежом, так и с 1990-х гг. в России, имеет двухсторонне расположенные серповидные поперечные ребра, не пересекающие продольные ребра (рис. 2).

В России и странах СНГ данная арматура производилась с 1994 г. по СТО АСЧМ 7–93 «Прокат арматурный периодического профиля», который соответствовал международному стандарту ISO 6935-2. В 2006 г. для производства арматурного проката в России был введен в действие ГОСТ Р 52544–2006 «Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов А500С и В500С для армирования железобетонных конструкций», а с 2016 г.

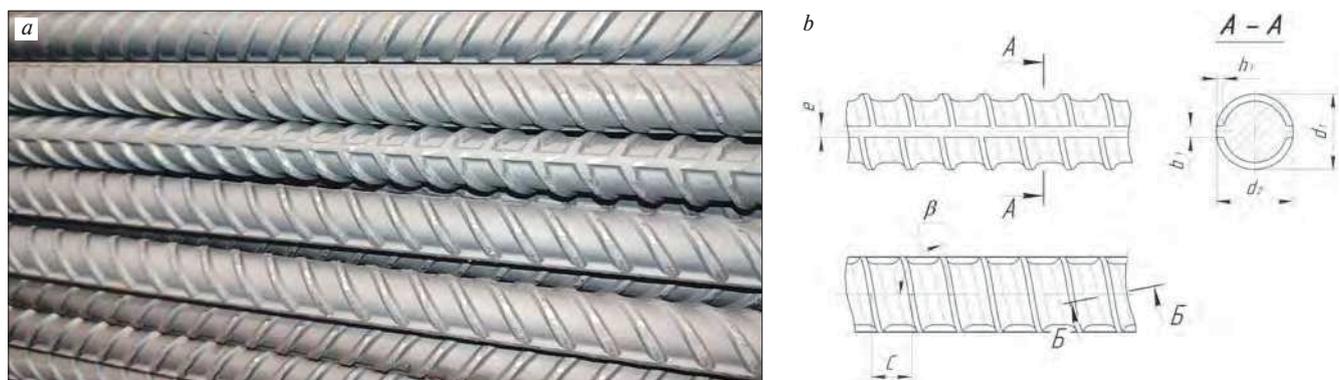


Рис. 1. Кольцевой периодический профиль: *a* – общий вид; *b* – конфигурация профиля
Fig. 1. Circular periodic profile: *a* – general view; *b* – profile configuration

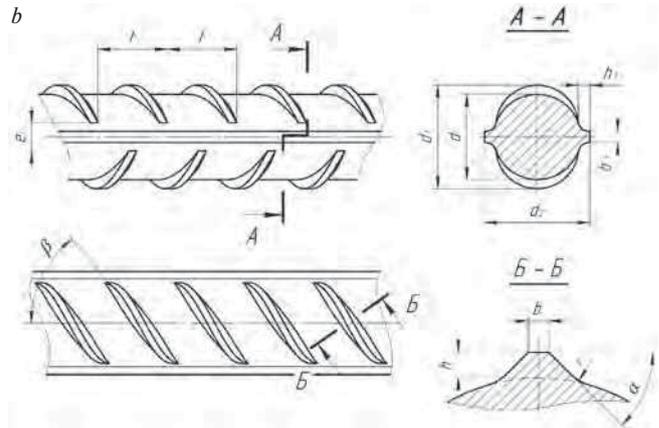


Рис. 2. Серповидный («европейский») периодический профиль: *a* – общий вид; *b* – конфигурация профиля
Fig. 2. Sickle-shaped («European») periodic profile: *a* – general view; *b* – profile configuration

ГОСТ 34028–2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций».

Главным преимуществом арматуры с «европрофилем» является ее более высокая выносливость при динамическом нагружении, чем у арматуры с кольцевым профилем, из-за отсутствия пересечений поперечных ребер с продольными.

Кроме указанного выше преимущества у арматуры с серповидным профилем имеется и ряд недостатков, выявленных в процессе ее производства и применения:

– увеличенная по сравнению с кольцевым профилем на 30–40%, изнашиваемость прокатных валков из-за роста кольцевых трещин по дну калибров

между поперечными канавками, усугубляющаяся в данном виде профиля давлением пузырей пара, образующихся в верхней замкнутой части серповидных канавок при прокате арматуры, которая обуславливает наличие дефектов на поверхности арматуры (рис. 3);

– сложность обеспечения повышенного критерия Рема ($f_R > 0,056$) из-за необходимости сохранения осевых жесткостей поперечного сечения арматуры и выполнения требований по овальности. Увеличивая высоту поперечных ребер, приходится увеличивать высоту и соответственно массу продольных ребер. В свою очередь, для увеличения высоты ребра необходимо увеличивать глубину канавки, однако запол-



Выкрашивание перемычки



Кольцевая трещина в ручье калибра после прокатки и следы после переточки валка



Глубина проникновения трещины на изломе валка



Отпечаток кольцевой трещины



Отпечаток на профиле № 12ту



Скол бурта № 10ту. Отпечаток на профиле

Рис. 3. Вид дефектов на поверхности калибров (*a*) и готовом профиле (*b*)

Fig. 3. Type of defects on the calibers surface (*a*) and the finished profile (*b*)

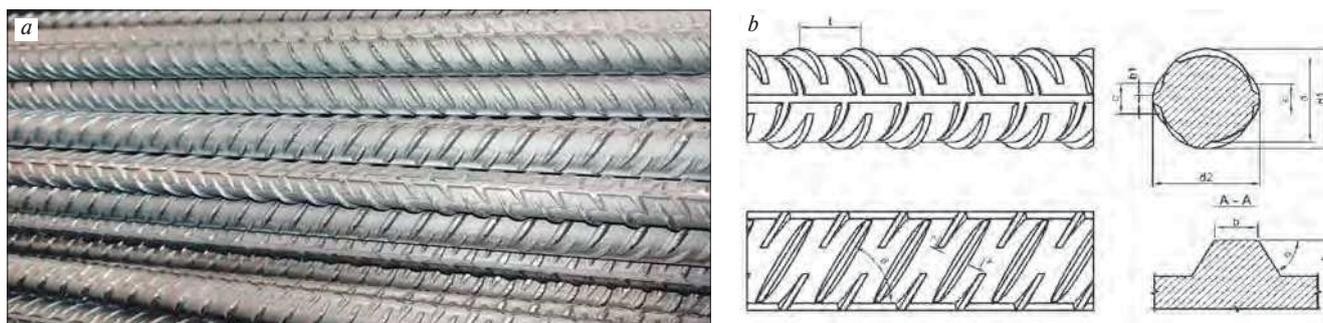


Рис. 4. Многорядный (шестирядный) периодический профиль: а – общий вид; б – конфигурация профиля
 Fig. 4. Multi-row (six-row) periodic profile: a – general view; b – profile configuration

нение канавки металлом на всю глубину в определенный момент прекращается;

– большой разброс до $\pm 6\%$ по погонной массе проката. Из-за сохранения постоянного количества канавок при переточке валков (возможность заложена большими допусками стандарта на шаг поперечных ребер) профиль, прокатанный на валках меньшего диаметра, получался тяжелее, чем на валках большего диаметра.

Многочисленные исследования показали, что у новой для России арматуры более низкие показатели сцепления с бетоном, чем у арматуры, ранее применявшейся [2–7]. В результате это было учтено в современных нормативных требованиях СНиП 52-01–2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» и СП 63.13330 «Бетонные и железобетонные конструкции», использование которых при проектировании железобетонных конструкций *увеличило расход арматуры на 10–30%* по сравнению со СНиП 2.03.01–84.

Из-за развала СССР, отсутствия конкурентных преимуществ отечественной арматуры, а также в результате наращивания производственных мощностей Китая, Индии, Турции и других стран Россия к настоящему времени потеряла практически весь зарубежный рынок арматурной продукции.

С целью повышения технико-экономических показателей отечественного арматурного проката, повышения его конкурентных показателей на отечественных и зарубежных строительных рынках уже давно назрела необходимость улучшения показателей старых или разработки новых видов периодического профиля арматурного проката.

В НИИЖБ им. А.А. Гвоздева неоднократно делались попытки совершенствования известных видов профиля арматуры [1–3].

На металлургических предприятиях также велись работы по улучшению технологических показателей их производства.

По результатам выполненных исследований было установлено, что полностью устранить выявленные недостатки производства и применения «кольцевой» и «европейской» арматуры невозможно. Эти недостатки могут быть только незначительно сглажены и уменьшены. Их наличие определено конструктивными решениями известных профилей [3, 7, 8].

Таким образом, назрела потребность в поиске принципиально новых конструктивных разработок периодического профиля арматурного проката. Сложность данной задачи заключалась в необходимости разработки такой конструкции профиля арматуры, которая удовлетворяла бы технологические требования, как производителя, так и потребителя [7].

С 2003 г. различные исследователи и организации разрабатывают и исследуют инновационные виды арматурного проката с принципиально новыми конструктивными решениями профиля поверхности, химическим составом металла, технологией изготовления.

Успешными оказались разработка и исследование арматуры с многорядным (шестирядным) профилем класса А500СП с высоким критерием Рема ($f_R \geq 0,075$) (рис. 4) [7]. Вырисовалась оригинальная концептуальная схема формы стержня, заключающаяся в том, что в дополнение к двум рядам поперечных серповидных выступов профиля стандартного «европейского» типа вводится два ряда близких по форме серповидных выступов (четвертные ребра), вершины которых расположены в плоскости продольных ребер стержня, причем шаг выступов в обеих парах рядов одинаков, а продольные оси выступов одной пары рядов относительно другой смещены на половину шага. Это позволило увеличить критерий Рема, не поднимая высоты выступов, что очень важно с точки зрения заполнения металлом поперечных канавок, и как дополнительный эффект – ограничить усилия распора в бетоне [9].

Форма профиля запатентована в Российской Федерации (Патент РФ № 2252991. Заявл. 3.07.2003), Украине, Индии, Узбекистане и др. Такая арматура более пятнадцати лет производится на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» по ТУ 14-1-5526–2006 «Прокат арматурный класса А500СП с эффективным периодическим профилем». К настоящему времени произведено и использовано в железобетоне около 4 млн т арматуры класса А500СП.

За время производства новой арматуры установлено:

– стойкость калибров прокатных валков возросла на 15–25% из-за уменьшения в два раза количества поперечных канавок, не выходящих на продольные

ребра, и увеличения размера перемычки металла между ними;

- возможность регулирования величины критерия Рема (f_R) изменением длины четвертных ребер и увеличением высоты всех поперечных ребер с выполнением условий по их полному заполнению металлом;

- легкость выполнения требований по стабильному производству арматуры с браковочным минимумом критерия Рема ($f_R \geq 0,075$), обеспечивающим высокие показатели сцепления арматуры с бетоном;

- предел выносливости новой арматуры сопоставим с показателями арматуры с «европейским» профилем и выше, чем у кольцевой арматуры, из-за отсутствия замкнутых по окружности поперечных ребер и уменьшения в два раза поперечных ребер, пересекающихся с продольными;

- увеличение прочности арматурного проката на 2–3%, в связи с увеличенной площадью поверхности стержней, контактирующей с охлаждающей водовоздушной средой в процессе термомеханического упрочнения при прокатке ($f_R \geq 0,075$) по тем же режимам, что и у используемых при производстве «европейской» арматуры ($f_R \geq 0,056$).

Вследствие снижения количества смен, перевалок и переходов прокатных клетей, времени на настройку станов, снижения расхода электроэнергии и топлива суммарный экономический эффект за четырнадцатилетний период производства арматуры класса А500СП на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» составил несколько сотен миллионов рублей.

С целью получения дополнительных потребительских свойств арматурного проката для увеличения его конкурентных преимуществ на строительном рынке в 2016 г. началась разработка нового профиля арматурного проката, сохранявшего преимущества многорядного профиля класса А500СП, которую возможно было бы практически осуществить на имеющемся прокатном оборудовании без значительных материальных затрат на его переделку (рис. 5).

Аккумулируя все наработки предшествующих мероприятий по способам расточки чистовых калибров арматурных профилей, производимых на

АО «ЕВРАЗ ЗСМК», учитывая состав и технические возможности оборудования прокатных станов, сформулировали основные достигаемые цели при производстве нового профиля:

- обеспечить расточку калибров на существующем парке вальцетокарных и фрезерных станков;

- обеспечить повышенную стойкость калибров без применения дорогостоящих материалов валков и условий их эксплуатации;

- обеспечить стабильность массы погонного метра профиля по всей длине раската и производство арматуры в узком поле допусков;

- обеспечить повышенные эксплуатационные характеристики арматурного проката.

Новая концептуальная форма и схема расположения поперечных ребер на поверхности стержня разрабатывались в развитие профиля с многорядным расположением поперечных ребер класса А500СП. В отличие от прототипа А500СП исключены классические серповидные ребра, а четвертные ребра были удлинены и разнесены в шахматном порядке на два ряда, высота продольных ребер уменьшена с возможностью полного отсутствия.

Таким решением одновременно достигаются повышение стойкости калибра, имеющего свободный отвод паров воды из поперечных канавок, и улучшенные потребительские характеристики, имеющие стабильные геометрические параметры, такие как увеличенный коэффициент Рема ($f_R \geq 0,075$), уменьшенный диапазон отклонения ширины профиля. Стабильность геометрии обусловлена снижением влияния межклетевого натяжения раската на изменение величины продольного ребра по причине его отсутствия и, как следствие, стабильность массы погонного метра профиля по длине раската.

Дополнительные потребительские свойства нового профиля можно получить при совмещении во время прокатки верхнего и нижнего ручья так, чтобы поперечные ребра образовали замкнутую двухзаходную винтовую линию. Тем самым профиль становится винтовым и позволит стыковать прутки между собой соединительными муфтами и анкеровать гайками.

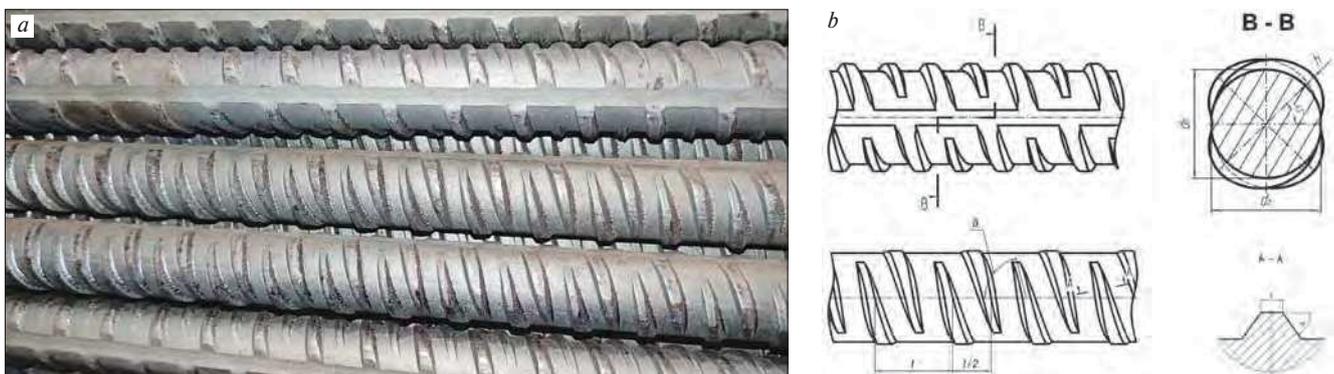


Рис. 5. Профиль арматуры с двухзаходным винтообразным расположением по поверхности серповидных ребер: *a* – общий вид; *b* – конфигурация профиля

Fig. 5. Reinforcement profile with a two-way helical arrangement on the surface of the crescent-shaped ribs: *a* – general view; *b* – profile configuration

Конструкция профиля защищена Патентом РФ № 2680153 (Заявл. 23.12.2016), европейским и евразийским патентами. Арматура с данным профилем производится на АО «Евраз ЗСМК» по ТУ 24.10.62-311-05757676–2019. «Прокат арматурный классов А500П, А500СП и А500СР».

Любая новая разработка периодического профиля арматурного проката требует не только обоснования его внедрения у производителя, но и тщательных исследований у потребителя. При внедрении арматуры с «европейским» серповидным профилем у производителя был обнаружен ряд существенных технологических недостатков. В результате этого ее массовое производство снизило производительность прокатных станов, из-за более высокой изнашиваемости чугунных валков, а также привело к увеличению расхода энергии на единицу продукции и ухудшению экологической ситуации в результате увеличения выбросов углекислого газа в окружающую среду.

Для оценки влияния вида профиля арматурного проката на потребительские свойства в течение многих лет выполнялись обширные исследования в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, ООО «Институт ВНИИ-железобетон», МГСУ (г. Москва), а также в ряде научных и учебных организаций России, Белоруссии, Украины, Казахстана, Болгарии, Румынии, Германии и др. [1–9].

По причине массового внедрения арматуры с «европейским» профилем в России в 1990-х гг. выполнялись обширные научные исследования данной арматуры [3, 4, 7], которые показали отсутствие каких-либо преимуществ по потребительским свойствам. Прочность сцепления с бетоном у арматуры с «европейским» профилем ниже, чем у арматуры с кольцевой формой поперечных ребер, на 20–40%; ширина раскрытия трещин в железобетоне с этой арматурой выше на 25–40%.

Единственным положительным фактором является повышенная выносливость «европейской» арматуры при циклическом динамическом нагружении из-за отсутствия пересечений поперечных ребер с продольными.

Однако этот показатель достаточно стабилен для горячекатаной арматуры, прочность которой достигается химическим составом стали. Для термомеханически упрочненной арматуры из низколегированных марок стали этот вопрос требует тщательного изучения, так как в данном случае при исследованиях наблюдался нестабильный положительный результат. От исходного химического состава стали (присутствия и количества легирующих добавок) и эффективности (режима) термомеханического упрочнения во многом зависит результат динамических многоцикловых испытаний, при которых внутри термоупрочненного металла происходят необратимые структурные изменения, обуславливаемые частотой, амплитудой, асимметрией цикла вынужденных колебаний. Эти характеристики дина-

мического воздействия могут влиять на внутренние температурные процессы, возникающие в атомно-кристаллической структуре металла, изменяющие ее, а следовательно, влияющие на прочностные (усталостные) свойства.

Внесение в нормы проектирования железобетонных конструкций СП 63.13330 расчетных параметров, корректирующих в большую сторону длину анкеровки арматуры и ширину раскрытия трещин относительно их значений по СНиП 2.03.01–84, аннулировало все достигнутые ранее преимущества отечественных проектных разработок для строительства относительно зарубежных и привело к большим материальным потерям.*

Предшествовавшие и сопровождавшие массовое внедрение новой арматуры с многорядными профилями классов А500СП и А500СР исследования включали:

- оценку прочности и деформативности опытных и промышленных партий арматуры;
- сцепление с бетоном;
- выносливость при циклическом динамическом нагружении;
- трещиностойкость и деформативность железобетонных элементов;
- анализ полученных результатов исследований, подготовку предложений для учета при проектировании, разработку технических условий (ТУ) для производителя и стандартов организации (СТО) для потребителя;
- корректировку проектной документации основных сборных железобетонных элементов типовых серий для замены обычного арматурного проката на новый с целью получения экономического эффекта;
- маркетинговые работы, выполняемые как производителем (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»), так и представителем потребителя (НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

Прочность и деформативность опытных и промышленных партий арматуры класса А500СП и А500СР

Производство арматурного проката класса А500СП на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» осуществляется с 2006 г. по настоящее время по ТУ 14-1-5526–2006. За этот период лабораторией комбината испытывались образцы арматуры всех произведенных партий проката разных диаметров. В табл. 1 приведены статистические показатели механических свойств арматуры класса А500СП за период 2010–2013 гг. [7].

В табл. 2 такие же статистические показатели приведены для А500СП за период 2014–2021 гг. и А500СР за 2020–2021 гг.

Статистическая обработка выполнялась по методике, подробно изложенной в ГОСТ 34028–2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия». Минимальные значения механических характеристик S_{min} приведены в табл. 3.

Таблица 1
Table 1

Статистические показатели механических свойств арматурного проката класса А500СП за 2010–2013 гг.
Statistical indicators of mechanical properties of rebar rolled products of А500SP class for 2010–2013

Испытания	Кол-во образцов	Средние значения					$\sigma_T^{0,95}$, Н/мм ²	$\sigma_B^{0,95}$, Н/мм ²	$\sigma_B^{0,95} / \sigma_T^{0,95}$	$\delta_5^{0,9}$, %	$AqT^{0,9}$, %
		σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	σ_B / σ_T	δ_5 , %	AqT , %					
НИИЖБ	255	618,8	729,6	1,18	21,63	8,91	560,9	637,5	1,14	18,98	7,4
ЗСМК	13157	586	690	1,18	20	9,2	543,1	644,4	1,18	16,6	7,7

Таблица 2
Table 2

Статистические показатели механических свойств арматурного проката классов А500СП за 2014–2021 гг. и А500СП за 2020–2021 гг.
Statistical indicators of mechanical properties of rebar rolled products of А500SP classes for 2014–2021 and А500sp for 2020–2021

Класс арматуры	Кол-во образцов	Ø, мм	Средние значения						S для $\bar{\sigma}_T$	$\sigma_T^{0,95}$, Н/мм ²	$\sigma_B^{0,95}$, Н/мм ²	$\sigma_B^{0,95} / \sigma_T^{0,95}$	$\delta_5^{0,9}$, %	$\delta_r^{0,9}$, %	$A_{qt}^{0,9}(\delta_{max}^{0,9})$, %	$\bar{\sigma}_T - 3S$, Н/мм ²
			$\bar{\sigma}_T$, Н/мм ²	$\bar{\sigma}_B$, Н/мм ²	$\bar{\sigma}_B / \bar{\sigma}_T$	$\bar{\delta}_5$, %	$\bar{\delta}_r$, %	$\overline{A_{qt}(\delta_{max})}$, %								
А500СП	59208	10–40	603	712	1,18	19	8,2	8,6	36	544	651	1,13	16,8	6,6	6,9	496
А500СП	369	12, 16, 25, 40	587	685	1,17	18,4	8,5	8,8	20	548	643	1,14	16,2	6,8	7,2	526

Таблица 3
Table 3

Минимальные значения механических характеристик C_{min}
Minimum values of mechanical characteristics C_{min}

Класс проката повышенной «Н» и высокой «Е» пластичности	Предел текучести $\sigma_{T(0,2)}$, Н/мм ²	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	Отношение фактических значений σ_B / σ_T	Относительное удлинение δ_5 , %	Равномерное удлинение δ_r , %	Полное относительное удлинение δ_{max} , %
А500С	Н	≥500	≥600	≥1,08	≥16	–
	Е			≥1,15–1,35	≥16	–
А500СП	≥515	≥600	≥1,08*	≥14	≥4,5*	≥5*
АУ500СП	≥520	≥600	≥1,08	≥14	≥4,5	≥5

* Требования СП14.13330.2018 (без внесенных изменений) на площадках с сейсмостойкостью 8–9 баллов.

Анализ полученных статистических показателей позволил в СТО 36554501-005–2006** «Применение арматуры класса А500СП в железобетонных конструкциях АО «НИЦ «Строительство» (Москва, 2013 г.) назначить расчетное сопротивление для данной арматуры 450 Н/мм².

Приведенные в табл. 2 статистические показатели арматуры класса А500СП, произведенной в 2014–2021 гг., подтвердили правильность данного решения.

Сравнение приведенных показателей механических свойств в табл. 1 и 2 с приведенными в табл. 3 их нормируемыми минимальными значениями показывает соответствие арматуры классов А500СП и АУ500СП классу повышенной пластичности «Н» по ГОСТ 34028–2016 и требованиям СП 14.13330.2018.

Использование в расчетах ЖБК по СТО 36554501-005–2006** повышенного расчетного сопротивления для класса А500СП, равного 450 Н/мм², относительно требуемого для арматуры класса прочности А500 по СП 63.13330.2018, равно 435 н/мм² позволило снизить расход арматуры в среднем на 3%.

Сцепление арматуры с многорядным периодическим профилем с бетоном

На рис. 6 приведены базовые значения длины анкеровки арматуры, определенные по нормам СССР (РФ), ЕКБ-ФИП и США (ASI-318). Данный рисунок хорошо иллюстрирует изменения в требованиях рассматриваемых нормативных документов во времени. В 1970 г. самая большая длина анкеровки

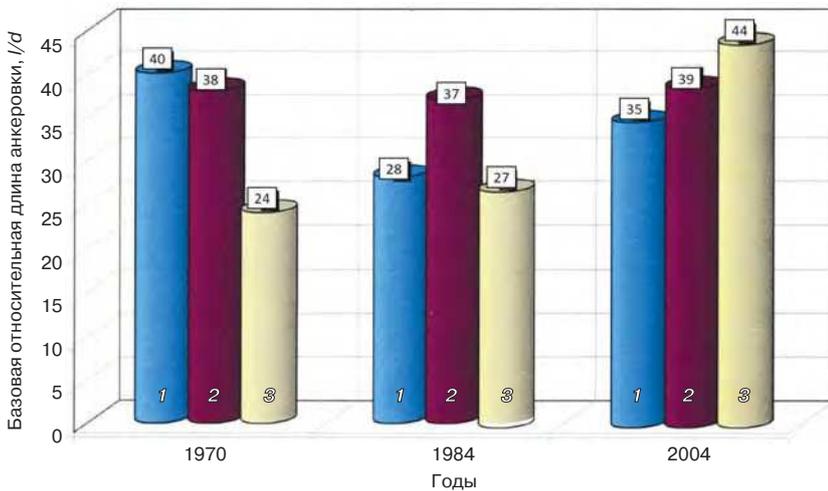


Рис. 6. Базовые значения длины анкеровки стержневой арматуры по нормам проектирования (бетон В25 (М350), арматура А400 (А-III) диаметром 18 мм): 1 – СССР (РФ); 2 – ЕКБ-ФИП; 3 – США (ACI-318)

Fig. 6. Basic values of the anchoring length of the rod reinforcement according to design standards (concrete B25 (M350), reinforcement A400 (A-III) with a diameter of 18 mm): 1 – USSR (RF); 2 – ECB-FIP; 3 – USA (ACI-318)

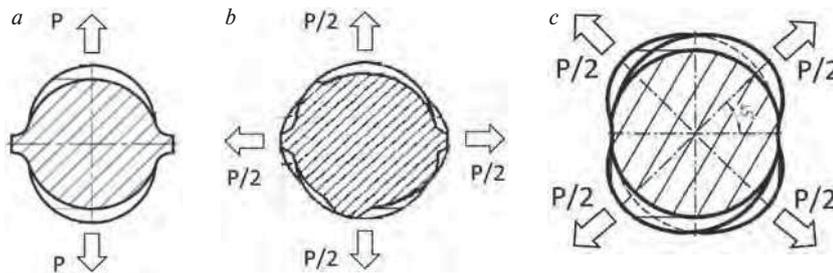


Рис. 7. Взаимодействие арматуры с разными видами профиля с окружающим бетоном: а – «европейский» двухрядный; б, с – многорядные профили арматуры классов А500СП и Ау500СП соответственно

Fig. 7. Interaction of reinforcement with different types of profile with surrounding concrete: а – «European» double-row; б, с – multi-row reinforcement profiles of class А500SP and Ау500SP, respectively

была по нормам СССР, а самая маленькая по нормам США. В нормах 1984 г. длина анкеровки по нормам СССР и США стала практически одинаковой. В этот период времени арматура с кольцевой формой профиля массово использовалась в этих странах, что и отразилось в требованиях норм.

В 2001 г. базовая длина анкеровки в РФ и США резко выросла, что было связано с массовым использованием в этих странах «европейской» арматуры с двухрядным расположением серповидных поперечных ребер (ЕКБ-ФИП).

Увеличение базовой длины анкеровки в нормах России составило в среднем 25%, что привело к перерасходу арматуры на анкерку в бетоне относительно объема ее применения на 1,5–3%.

Взаимодействие с окружающим бетоном «европейской» арматуры с двухрядным расположением серповидных поперечных ребер и арматуры классов А500СП и Ау500СП с многорядным расположением приведено на рис. 7.

По сравнению с двухрядным серповидным многорядный профиль позволяет при одинаковой вы-

соте поперечных ребер поднять на 30–40% относительную площадь смятия ими бетона (f_R), при том что шаг ребер в каждом ряду увеличивается на 10–15%. Увеличенный шаг расположенных вразбежку поперечных ребер облегчает внедрение между ними зерен крупного заполнителя, что повышает прочность сцепления. Многорядная компоновка поперечных ребер делает более равномерным по контуру сечения стержня распределение расклинивающих бетон усилий распора, возникающих в зонах анкеровки или нахлестки арматуры (рис. 7).

Выполненные исследования выявили способность при вытягивании из бетона В40 стержней класса А500СП с многорядным (шестирядным) профилем (при длине заделки всего восемь диаметров) сохранять достаточную прочность сцепления даже при значительных пластических деформациях стержней при растягивающих напряжениях на уровне предела текучести [9].

В одинаковых условиях стержни с «европейским» двухрядным профилем с ребрами той же высоты теряют прочность сцепления при значительно меньших пластических деформациях арматуры. Из-за этого затраты энергии на разрушение сцепления при испытаниях на вытягивание (энергоёмкость сцепления) многорядных профилей заметно выше двухрядных. Экспериментально уста-

новлено также, что энергоёмкость сцепления нового профиля превышает аналогичный показатель, демонстрируемый и кольцевым профилем. В этом случае причиной разрушения сцепления после достижения σ_T в кольцевой арматуре является потеря прочности бетонных междуреберных консолей от среза в результате меньшей площади их проекции на поверхность сердечника арматурных стержней.

Данный показатель необходим для обеспечения стойкости конструкции зданий и сооружений против прогрессирующего обрушения в условиях предельной (катастрофической) стадии нагружения.

Надежное сцепление арматуры с бетоном определяет пластическое деформирование опасных (анкерующих) зон конструктивных элементов зданий и, следовательно, обеспечивает перераспределение внутренних усилий, необходимое для диссипации (рассеяния) энергии внешнего силового воздействия [9].

Отмеченная особенность сопротивления разрушению сцепления с бетоном арматуры с двухрядными и многорядными профилями наиболее наглядно

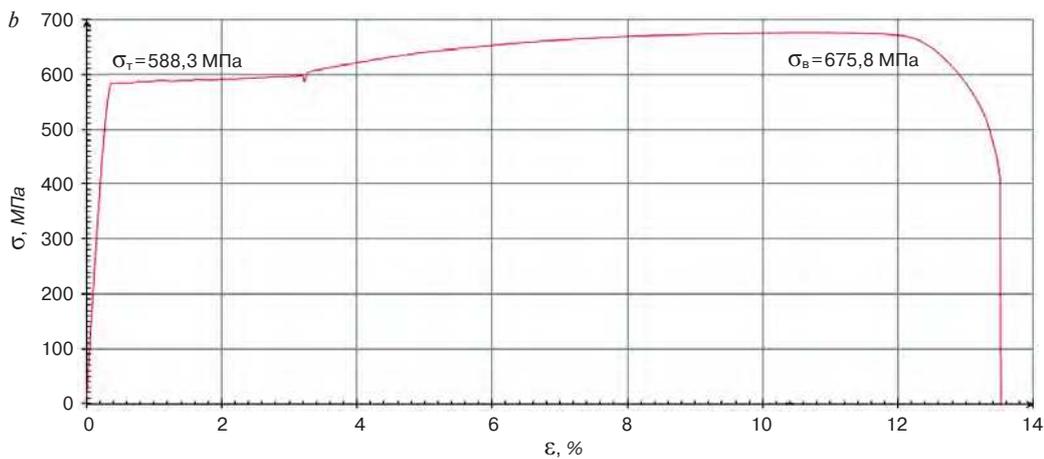
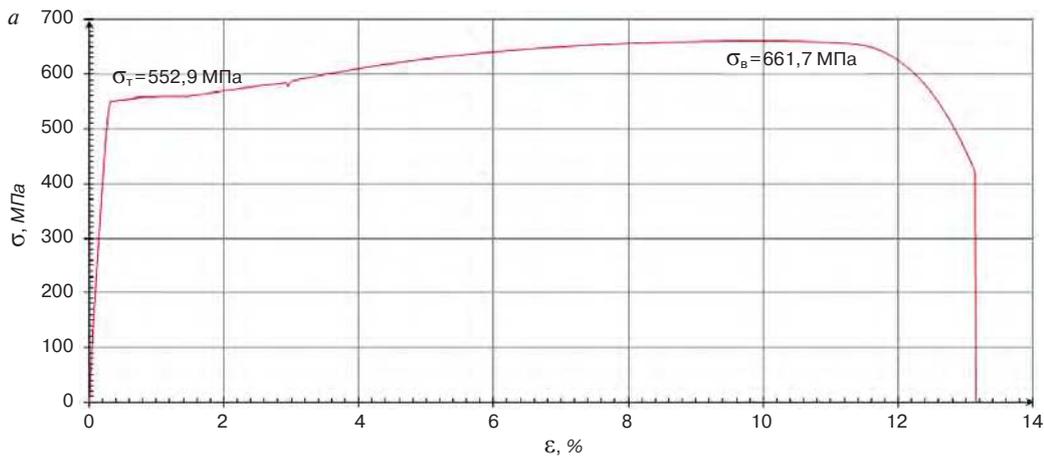


Рис. 8. Механические испытания винтовой арматуры: *a* – двухрядной (аналог GEWI-Stahl); *b* – четырехрядной (Av500P)
Fig. 8. Mechanical tests of screw fittings: *a* – two-row (analog GEWI-Stahl); *b* – four-row (Av500P)

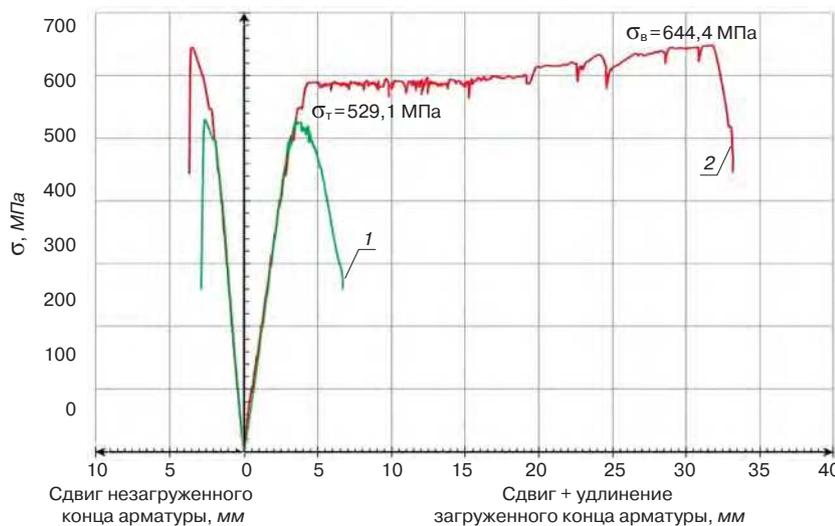


Рис. 9. Испытания сцепления с бетоном винтовой арматуры ($d = 16$ мм, заделка в бетоне 5d, прочность бетона 72,2 МПа): *1* – класса Av500 (аналог GEWI-Stahl), $f_R = 0,091$, с двухрядным профилем; *2* – класса Av500P, $f_R = 0,072$, с четырехрядным профилем

Fig. 9. Tests of adhesion to concrete of screw fittings ($d = 16$ mm, sealing in concrete 5d, concrete strength 72.2 MPa): *1* – class Ab500 (analog GEWI-Stahl), $f_R = 0.091$, with a double-row profile; *2* – class Av500P, $f_R = 0.072$, with a four-row profile

иллюстрируется результатами опытов, выполненными в ООО «Институт ВНИИжелезобетон» [10].

В этом случае оценивалось сцепление с бетоном арматуры с двухрядным винтовым профилем (аналог

GEWI-Stahl) массово производимой и широко применяемой в ряде стран Европы, Азии, Америки и используемой не только в качестве анкерующих и крепежных элементов в строительстве, но и как арматура

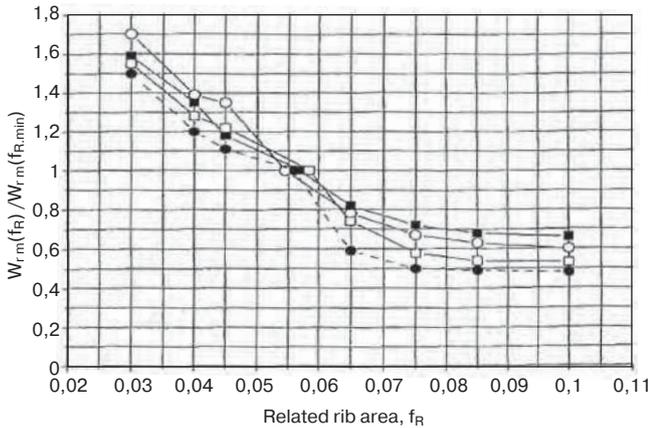


Рис. 10. Зависимость относительной ширины раскрытия трещин (W_{zm}) от параметра f_R [8]
Fig. 10. Dependence of the relative crack opening width (W_{zm}) on the f_R parameter [8]

для железобетонных конструкций особо ответственных зданий и сооружений атомно-энергетической, гидротехнической, военной отраслей, а также в высотном строительстве и мостостроении.

Механические свойства бетона и исследованной арматуры были практически одинаковы (рис. 8).

Испытания статическим нагружением производились по методике, разработанной для подобных исследований в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева и используемой в Испытательном центре ООО «Институт ВНИИЖелезобетон». Она полностью соответствует методике RILEM Рекомендации RC 6, Испытание на сцепление арматурной стали – 2. Испытания выдерживанием (1983 г.). Отличие отечественной и зарубежной методики испытаний на сцепление арматуры с бетоном состоит в рекомендации первой о необходимости одновременных замеров не только сдвига незагруженного конца испытываемой арматуры относительно бетона, но и удлинения ее загруженного конца, вплоть до разрыва арматуры или ее вытягивания из бетона.

Отечественная методика испытаний позволяет оценить и сопоставить сцепление с бетоном арматуры разных видов, как в эксплуатационной, так и в запредельной стадии нагружения, т. е. до и после достижения в арматуре физического (σ_T) или условного (σ_{02}) предела текучести (рис. 9).

Как видно из результатов испытаний, приведенных на рис. 9, арматура с четырехрядным расположением поперечных ребер с длиной анкеровки $5d$ сохраняет сцепление с бетоном прочностью 72,2 МПа на упругом и пластическом участках деформирования металла стержня. При этом прочность сцепления с бетоном продолжает увеличиваться при нагружении загруженного конца арматуры до относительных деформаций, достигающих $\epsilon_s=5\%$, т. е. после прохождения горизонтального участка пластического деформирования (рис. 8, b).

Всплески на диаграмме деформирования загруженного конца четырехрядной арматуры после достижения σ_T фиксируют процесс перераспределения

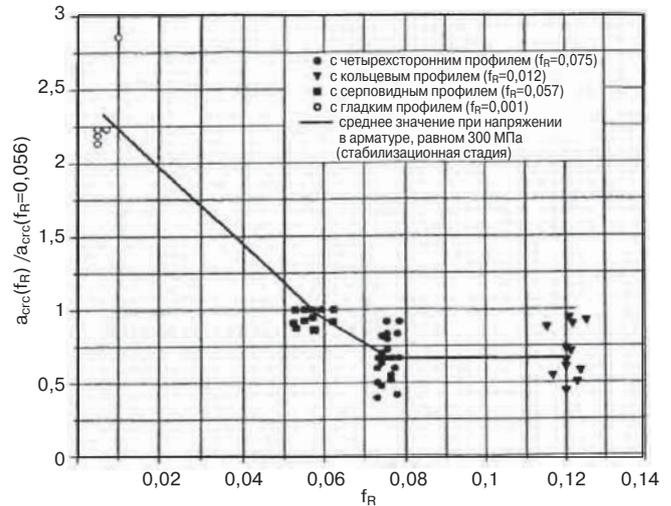


Рис. 11. Зависимость относительной ширины раскрытия трещин (a_{crc}) в бетоне от f_R [6]
Fig. 11. Dependence of the relative crack opening width (a_{crc}) in concrete on f_R [6]

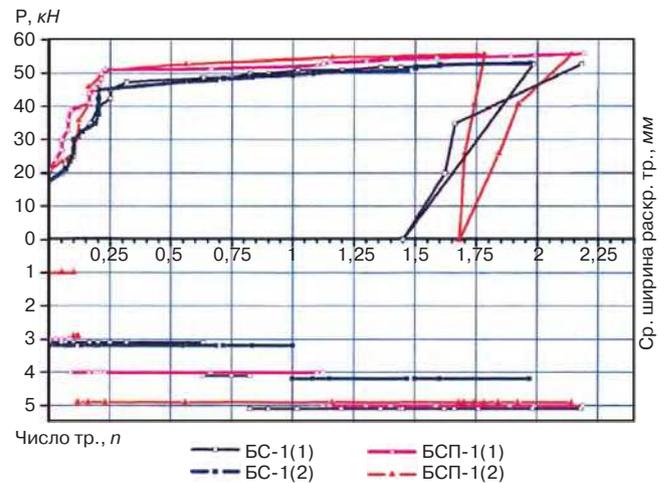


Рис. 12. Характер развития трещин в опытных балках, $R_b=400$ Н/мм²: BS – балки с «европейским» двухрядным профилем арматуры А500С $\varnothing 16$ мм; BSP – балки с многорядным профилем арматуры А500СП $\varnothing 16$ мм; BS – 1(1); $\sigma_T=579$ Н/мм²; BS – 1(2); $\sigma_T=547$ Н/мм²; $f_R=0,056$; BSP – 1(1); $\sigma_T=539$ Н/мм²; BSP – 1(2); $\sigma_T=551$ Н/мм²; $f_R=0,075$
Fig. 12. The nature of the development of cracks in experimental beams, $R_b=400$ N/mm²: BS – beams with a "European" double-row profile of reinforcement А500С $\varnothing 16$ mm; BSP – beams with a multi-row profile of reinforcement А500СП $\varnothing 16$ mm; BS – 1(1); $\sigma_T=579$ N/mm²; BS – 1(2); $\sigma_T=547$ N/mm²; $f_R=0,056$; BSP – 1(1); $\sigma_T=539$ N/mm²; BSP – 1(2); $\sigma_T=551$ N/mm²; $f_R=0,075$

усилий по длине анкерующего конца арматуры в результате потери сцепления с бетоном на его отдельных участках с сохранением или даже увеличением достигнутых прочностных показателей. Это еще раз подтверждает высокую энергоемкость сцепления арматуры с многорядным профилем, установленную ранее в опытах с арматурой класса А500СП [9], и свидетельствует о целесообразности ее широкомасштабного применения для обеспечения высокой надежности сопротивления железобетонных конструкций различным видам нагружения.

Полученные результаты научных исследований позволили в СТО 36554501-005–2006* для арматуры

класса А500СП, а позже в СТО 36554501-005–2020* также для арматуры классов А_у500СП и А600СП рекомендовать уменьшение расчетной базовой длины анкеровки арматуры ($l_{0ан}$) на 12%.

Это уменьшило почти в два раза перерасход арматуры при расчете ее длины анкеровки и нахлестки, получаемый в результате замены при проектировании железобетонных конструкций СНиП 2.03.01–84* «Строительные нормы и правила. Бетонные и железобетонные конструкции» на СП 63.13330 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». Эффективность сцепления с бетоном арматуры с многорядным профилем в эксплуатационной и запредельной стадиях деформирования позволила рекомендовать ее в СТО 36554501-059–2018 «Строительство в сейсмических районах» в качестве предпочтительной для применения.

Отмеченные выше преимущества по сцеплению с бетоном винтовой арматуры класса Ав500П с четырехрядным профилем перед винтовой арматурой с двухрядным профилем (аналог GEWI-Stahl) в запредельной стадии деформирования обеспечивают высокий конкурентный потенциал этой арматуре, способствующий импортозамещению зарубежной винтовой арматурной продукции (GEWI-Stahl) на отечественном строительном рынке и ее продвижению на зарубежных торговых и строительных площадках.

Влияние вида периодического профиля арматуры на ширину раскрытия трещин в железобетонных конструкциях

Многочисленными исследованиями железобетонных элементов с арматурой кольцевого и двухрядного («европейского») профиля установлена зависимость ширины раскрытия трещин от критерия Рема (f_R) [2, 3, 6, 8]. Наглядно иллюстрируют данную зависимость графики, приведенные на рис. 10, 11, построенные на базе зарубежных [8] и отечественных исследований [6].

На приведенных графиках четко зафиксирована величина критерия Рема $f_R=0,075$, превышение которой не влияет на ширину раскрытия трещин в железобетоне.

Исходя из этого арматура с кольцевым профилем по ГОСТ 5781–82 «Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия» с критерием Рема $f_R \geq 0,1$ не имеет существенных преимуществ по сравнению с многорядной арматурой по трещиностойкости и деформативности, что подтверждается опытами [5, 6].

Как говорилось выше, методики расчета СНиП 2.03.01–84* построены на базе испытаний элементов с кольцевой арматурой.

Зарубежные методики расчета построены на базе испытаний элементов с «европейской» двухрядной арматурой, имеющей серповидные поперечные ребра с браковочным минимумом $f_{Rmin} \geq 0,056$.

Из приведенных на рис. 10, 11 графиков видно, что при $f_R=0,056$ ширина раскрытия трещин в железобетоне на 40% выше, чем при $f_R \geq 0,075$.

В среднем такая же разница в результатах расчетов ширины раскрытия трещин по нормам ЕКБ-ФИП и СНиП 2.03.01–84*.

Эффективность использования арматуры с многорядным периодическим профилем классов А500СП и А_у500СП подтверждена испытаниями растянутых призм (рис. 11) [6] и изгибаемых балок (рис. 12) [5].

Полученные результаты исследований позволили в СТО НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», разработанных для проектирования железобетонных конструкций с данными классами многорядной арматуры ($f_R \geq 0,075$), рекомендовать уменьшение расчетной ширины раскрытия трещин на 25% относительно результатов расчетов по СП 63.13330.

Это в значительной степени, но не полностью компенсирует потери в расходе арматуры для железобетонных элементов, рассчитываемых по второму предельному состоянию, произошедшие при переходе на использование СП 63.13330 вместо СНиП 2.03.01–84*.

Выводы

1. На АО «ЕВРАЗ ЗСМК» произведены, в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» исследованы и внедрены в практику проектирования и строительства новые виды арматурного проката с многорядным расположением поперечных ребер на поверхности.

2. На АО «ЕВРАЗ ЗСМК» замена производства арматуры с «европейским» серповидным профилем, имеющим двухрядное расположение поперечных ребер по ГОСТ Р 52544–2006 класса А500С на арматуру с многорядным их расположением по ТУ 14-1-5526–2006 класса А500СП и ТУ 24.10.62-311-05757676–2019 классов Ав500П, Ав500СП и А_у500СП позволила:

- повысить стойкость калибров прокатных валков на 15–25%, в результате чего увеличить производительность прокатных станов из-за уменьшения количества перевалок прокатных клетей и переходов калибров, сократить время на их настройку;

- получить возможность проката со стабильной погонной массой и выдержкой минусовых допусков (ОМ2 по ГОСТ 34028) из-за отсутствия продольных ребер (Ав500П, Ав500СП и А_у500СП);

- обеспечить высокие браковочные значения критерия Рема ($f_R \geq 0,075$) без каких-либо технологических трудностей;

- обеспечить прокатку арматуры с возможностью ее многоцелевого использования при образовании двухзаходной винтовой резьбы (Ав500П), позволяющей стыкование стержней муфтами и их анкеровку гайками;

- снизить затраты на потребление электроэнергии и топлива (смесь газов);

- уменьшить выбросы парникового газа в окружающую среду;

– получить экономический эффект от внедрения и производства на комбинате 4 млн т новой арматуры несколько сотен миллионов рублей.

– обеспечить конкурентные преимущества арматуры АО «ЕВРАЗ ЗСМК» на строительном рынке.

3. В результате выполненных в 2003–2021 гг. исследований потребительских свойств арматуры с многорядным периодическим профилем классов А500СП, А_у500СП и А600СП в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» разработаны и внедрены для проектирования железобетонных конструкций СТО 36554501-005–2006 «Применение арматуры класса А500СП в железобетонных конструкциях» и СТО 36554501-065–2020 «Применение арматуры классов А500СП, А_у500СП и А600СП в железобетонных конструкциях», использование положений которых при расчете железобетонных конструкций позволяет:

– уменьшить базовую длину анкеровки арматуры в бетоне на 12%;

– уменьшить расчетную ширину раскрытия трещин в железобетоне на 20–30%;

– снизить расход арматуры при производстве железобетонных конструкций в среднем на 2–3% из-за стабильного производства проката с минусовыми допусками;

– повысить надежность железобетонных конструкций при аварийных воздействиях (сейсмика, удары, взрывы и т. п.) в результате сохранения сцепления с бетоном анкерующих участков арматуры после достижения предела текучести;

– обеспечить повышенную выносливость арматуры в результате уменьшения в два раза количества пересечений продольных и поперечных ребер (А500СП) и отсутствия продольных ребер (А_у500СП и А_в500П);

– произвести импортозамещение однозаходной винтовой зарубежной арматуры с двухрядным профилем (CEWI-Stahl) на четырехрядную двухзаходную класса А_в500П, защищенную патентами РФ (№ 2680153, 2016), европейским и евразийским патентами.

За прошедшие 14 лет производства арматуры класса А500СП с многорядным профилем на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» сформировался ее постоянный потребитель со среднегодовым объемом применения около 100 тыс. т.

Оценка эффективности использования арматуры с многорядным профилем по СТО 36554501-005–2006

Список литературы

1. Мулин Н.М., Коневский В.П., Судаков Г.Н. Новые типы профиля для стержней арматуры. *Эффективные виды арматуры для железобетонных конструкций: Сб. науч. тр.* М.: НИИЖБ, 1970. С. 16–45.
2. Мулин Н.М. Стержневая арматура железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1974. 233 с.

на заводах ЖБИ и строительных объектах из расчета средней стоимости арматуры 40 тыс. р./т за прошедший период производства и объема применения 100 тыс. т в год:

– за счет повышения прочности на 3,45%:

$$100\ 000 \cdot 0,0345 \cdot 40\ 000 = 138\ \text{млн р.};$$

– за счет расчета ширины раскрытия трещин по СТО и снижения в среднем на 10% расхода металла на армирование изгибаемых элементов, составляющих около 50% от общего количества железобетонных конструкций:

$$100\ 000 \cdot 0,5 \cdot 0,1 \cdot 40\ 000 = 200\ \text{млн р.};$$

– за счет уменьшения базовой длины анкеровки на 12%, сокращение расхода арматуры составляет в среднем 2% от общего объема ее применения:

$$100\ 000 \cdot 0,02 \cdot 40\ 000 = 80\ \text{млн р.}$$

Итого 418 млн р., или 4180 р./т.

За прошедшие 14 лет производства и применения арматуры класса А500СП экономический эффект в строительстве составил:

$$\Xi = 418\ 000\ 000 \cdot 14 = 5,852\ \text{млрд р.}$$

Проектирование железобетонных конструкций по актуализированной редакции СТО 36554501-065–2020* «Применение арматуры классов А500СП, А_у500СП и А600СП в железобетонных конструкциях» с заменой арматуры с двухрядным «европейским» профилем класса А500С на арматуру с многорядным профилем классов А500СП, А_у500СП и А_в500П в объеме годового производства стержневой арматуры на АО «ЕВРАЗ ЗСМК», составляющем около 500 тыс. т, позволит получить годовой экономический эффект при средней стоимости арматуры в настоящее время 60 тыс. р./т. за счет:

– повышения прочности:

$$500\ 000 \cdot 0,0345 \cdot 60\ 000 = 1,035\ \text{млрд р.};$$

– уменьшения ширины раскрытия трещин:

$$500\ 000 \cdot 0,5 \cdot 0,1 \cdot 60\ 000 = 1,5\ \text{млрд р.};$$

– снижения базовой длины анкеровки

$$500\ 000 \cdot 0,02 \cdot 60\ 000 = 600\ \text{млн р.}$$

Итого 3,135 млрд р., или 6270 р./т.

Широкомасштабное внедрение новых видов арматурного проката с многорядными профилями позволит повысить эффективность отечественного арматурного проката и строительства из железобетона за счет снижения их себестоимости, повышения безопасности и конкурентоспособности. При общем производстве стержневой арматуры в России около 4 млн т в год экономический эффект от внедрения новой арматуры может составить:

$$\Xi = 4\ 000\ 000 \cdot 6270 = 25,080\ \text{млрд р.}$$

References

1. Mulin N.M., Konevskii V.P., Sudakov G.N. New types of profiles for reinforcement bars. *Effective types of reinforcement for reinforced concrete structures: Collection of scientific papers.* Moscow: NIIZhB. 1970, pp. 16–45. (In Russian).
2. Mulin N.M. Sterzhnevaya armatura zhelezobetonnykh konstrukcij [Core reinforcement of reinforced concrete structures]. Moscow: Stroyizdat. 1974. 233 p.

3. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. М.: Воентехлит, 2000. 256 с.
4. Климов Ю.А. Исследования и нормирование механических характеристик и служебных свойств арматуры проката ДСТУ 3760–98. Опыт применения в конструкциях из обычного и предварительно напряженного железобетона. II Всероссийская (международная) конференция по бетону и железобетону. Т. 5. М., 2005. С. 406–415.
5. Саврасов И.П. Прочность, трещиностойкость и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, армированных сталью класса А500 с различным периодическим профилем. Дис. ... канд. техн. наук. М.: НИИЖБ, 2010. 207 с.
6. Цыба О.О. Трещиностойкость и деформативность растянутого железобетона с ненапрягаемой стержневой арматурой, имеющей различную относительную площадь смятия поперечных ребер. Дис. ... канд. техн. наук. М.: НИИЖБ, 2012. 203 с.
7. Тихонов И.Н., Мешков В.З., Расторгуев Б.С. Проектирование армирования железобетона. М.: Бумажник, 2015. 273 с.
8. Mayer U. Zum Einfluss der Oberflächengestalt von Ripptnstählen auf das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen, Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, IWB – Mitteilungen 2002/1.
9. Тихонов И.Н., Мешков В.З., Звездов А.И., Саврасов И.П. Эффективная арматура для железобетонных конструкций зданий, проектируемых с учетом воздействия особых нагрузок // *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 39–45.
10. Тихонов И.Н., Смирнова Л.Н., Бубис А.А., Тихонов Г.И., Сафонов А.А. О новых видах арматурного проката для сейсмостойкого строительства // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2019. № 5. С. 20–27.
3. Madatyan S.A. Armatura zhelezobetonnykh konstrukcij [Reinforcement of reinforced concrete structures]. Moscow: Voentechlit. 2000. 256 p.
4. Klimov Yu.A. Investigations and rationing of mechanical characteristics and service properties of rolled steel products DSTU 3760–98. Experience in applications in structures made of ordinary and prestressed reinforced concrete. II All-Russia (International) conference on concrete and reinforced concrete. Vol. 5. Moscow. 2005, pp. 406–415. (In Russian).
5. Savrasov I.P. Strength, crack resistance and deformability of bent reinforced concrete elements reinforced with A500 steel with different periodic profiles. Cand. Diss. (Engineering). Moscow: NIIZhB. 2010. 207 p. (In Russian).
6. Tsyba O.O. Fracture resistance and deformability of stretched reinforced concrete with unstressed rod reinforcement, which has different relative area of crumpling of transverse edges. Cand. Diss. (Engineering). Moscow: NIIZhB. 2012. 203 p. (In Russian).
7. Tikhonov I.N., Meshkov V.Z., Rastorguev B.S. Proektirovanie armirovaniya zhelezobetona [Designing reinforced concrete reinforcement]. Moscow: Bumazhnik. 2015. 273 p.
8. Mayer U. Zum Einfluss der Oberflächengestalt von Ripptnstählen auf das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen, Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, IWB – Mitteilungen 2002/1.
9. Tikhonov I.N., Meshkov V.Z., Zvezdov A.I., Savrasov I.P. Effective reinforcement for reinforced concrete structures of buildings, designed taking into account the impact of special loads. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 3, pp. 39–45. (In Russian).
10. Tikhonov I.N., Smirnova L.N., Bubis A.A., Tikhonov G.I., Safonov A.A. About New Types of Reinforcing Rolled Metal for Earthquake Engineering. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2019. No. 6, pp. 20–27. (In Russian).

Компания ЕВРАЗ

По вопросам поставок новой арматуры: +7(967) 085 04 33; +7(909) 907 39 80

По техническим вопросам: +7(909) 907 48 79

Новая арматура с четырехрядным профилем на объектах атомной энергии

В начале декабря 2021 г. в РААСН состоялось заседание научного совета «Железобетонные конструкции, методы расчета и проектирования», на котором были представлены результаты научно-исследовательской работы «Обоснование применимости новой арматуры с четырехрядным профилем на объектах использования атомной энергии (проведение испытаний и разработка нормативно-технической документации)», выполненной НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство».

В обсуждении указанной работы приняли участие акад., вице-президент РААСН В.И. Травуш, акад., академик-секретарь ОН РААСН Н.И. Карпенко, акад. В.И. Колчунов, директор НИИЖБ им. А.А. Гвоздева Д.В. Кузеванов, д-р техн. наук А.Г. Тамразян и др. Председатель научного совета РААСН «Железобетонные конструкции, методы расчета и проектирования» чл.-корр С.Б. Крылов подписал экспертное заключение по результатам НИИОКР, в котором отмечено, что арматура с четырехрядным винтовым профилем является отечественным инновационным продуктом, защищенным патентом РФ (№ 2680153 от 2016 г.), европейским и евразийским патентами; приведенные материалы исследований доказывают возможность производства новой винтовой арматуры на существующем металлургическом оборудовании без каких-либо значительных дополнительных затрат; выполнение всех основных потребительских требований, предъявляемых к арматурному прокату для его использования на строительных объектах; возможность и технологичность использования механических муфтовых соединений новой винтовой арматуры, перспективность применения резьбоклеевых муфтовых соединений; эффективность внедрения винтовой арматуры с четырехрядным профилем, связанную с вопросами безопасности, в результате сохранения сцепления анкерующих участков арматуры в запредельной стадии деформирования; высокие конкурентные преимущества арматуры с четырехрядным профилем над арматурой с двухрядным серповидным профилем («европрофиль»); возможность использования новой арматуры с нахлесточными, сварными, механическими обжимными, резьбовыми нарезными и накатанными муфтовыми соединениями. Принято решение рекомендовать продолжить работы по внедрению винтовой арматуры с четырехрядным профилем в строительство как объектов Госкорпорации «Росатом», так и других ответственных объектов транспортного, гидротехнического, высотного, военного назначения.

В.В. НЕЛЮБОВА, канд. техн. наук (nelubova@list.ru), С.А. УСИКОВ, инженер (serjikk94@mail.ru), В.В. СТРОКОВА, д-р техн. наук (vvstrokova@gmail.com), Д.Д. НЕЦВЕТ, канд. техн. наук (netsvet_dd@mail.ru)
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

Состав и свойства самоуплотняющегося бетона с использованием комплекса модификаторов

Современное строительство практически нереализуемо без использования высококачественных модифицированных бетонов, отличающихся многокомпонентностью и широким функционалом. Среди многообразия новых видов бетонов особенно выделяются самоуплотняющиеся, отличающиеся высокой подвижностью смеси и стойкостью к расслоению при низком содержании воды в системе и, как следствие, способностью к заполнению различных матричных форм, включая густоармированные элементы. Для получения самоуплотняющейся бетонной смеси с требуемыми реологическими параметрами необходимо использование низкого водоцементного отношения, высокой доли дисперсных и пластифицирующих добавок и др. В работе предложено использование органо-минерального модификатора карбонатно-кремнеземистого состава и гиперпластификатора. Порошковый модификатор отличается достаточной активностью (по данным сорбционной емкости и центров адсорбции на поверхности). Совместное использование добавок обеспечивает получение подвижной смеси высокой плотности, стойкой к расслаиванию и отличающейся достаточной сохраняемостью свойств во времени. Получены составы самоуплотняющихся смесей тяжелого бетона с высокой подвижностью и устойчивостью к расслаиванию, обеспечивающие получение бетона с пределом прочности при сжатии 85–97 МПа, соответствующим классам В60–В75 с существенным запасом прочности и водонепроницаемостью до W14. Полученные номограммы могут быть использованы в задачах подбора состава прочного и высокопрочного бетона высокого качества.

Ключевые слова: бетон, тяжелый бетон, самоуплотняющаяся смесь, модификатор, карбонатно-кремнеземистая добавка, пластификатор.

Для цитирования: Нелюбова В.В., Усиков С.А., Строкова В.В., Нецвет Д.Д. Состав и свойства самоуплотняющегося бетона с использованием комплекса модификаторов // *Строительные материалы*. 2021. № 12. С. 48–54.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-48-54>

NELYUBOVA V.V., Candidate of Sciences (Engineering) (nelubova@list.ru), USIKOV S.A., Engineer (serjikk94@mail.ru), STROKOVA V.V., Doctor of Sciences (Engineering) (vvstrokova@gmail.com), NETSVET D.D., Candidate of Sciences (Engineering) (netsvet_dd@mail.ru)
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

Composition and Properties of Self-Compacting Concrete Using a Complex of Modifiers

Modern construction is practically impossible to implement without the use of high-quality modified concrete, characterized by multicomponent and wide functionality. Among the variety of new types of concretes, self-compacting concretes are notably stand out, characterizing by high mobility of the mixture and resistance to delamination with a low water content in the system and, as a result, the ability to fill various matrix forms, including densely reinforced elements. To obtain a self-compacting concrete mixture with the required rheological parameters it is necessary to use a low water-cement ratio, a high proportion of dispersed and plasticising additives, etc. The paper proposes the use of an organo-mineral modifier of carbonate-silica composition and a hyperplasticiser. The powder modifier is characterized by sufficient activity (according to the sorption capacity and adsorption centers on the surface). The combined use of additives ensures the production of a high-density mobile mixture, resistant to delamination and characterized by sufficient retention of properties over time. Compositions of self-compacting concrete mixtures of heavy concrete with high mobility and resistance to delamination have been obtained, providing concrete with a compressive strength of 85–97 MPa corresponding to classes B60–B75 with a significant margin of strength, water resistance up to W14. The obtained nomograms can be used in the tasks of selecting the composition of durable and high-strength concrete of high quality.

Keywords: concrete, self-compacting mixture, modifier, plasticiser, viscosity, mobility, strength.

For citation: Nelyubova V.V., Usikov S.A., Strokov V.V., Netsvet D.D. Composition and properties of self-compacting concrete using a complex of modifiers. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 12, pp. 48–54. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-48-54>

Современные тенденции развития архитектурно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений, технологий возведения объектов различного назначения требуют улучшения физико-механических и эксплуатационных характеристик изделий и конструкций при одновременном снижении материальных, трудовых и энергетических затрат. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка новых эффективных материалов, методов их испытаний, расчета и проектирования конструкций на их основе.

На протяжении последних десятилетий ввиду увеличения этажности зданий российских мегаполисов, специфики условий строительства и эксплуатации

конструкций, развития основ строительства уникальных объектов происходит эволюция бетонов с формированием широкой номенклатуры композиций, отличающихся специфическими свойствами. Так, в настоящее время как в России, так и за рубежом разрабатываются и активно внедряются: высоко- и ультравысокопрочные бетоны (High/Ultra High-Strength Concrete, UHSC [1]); высоко- и ультравысокофункциональные бетоны (High/Ultra High Performance Concretes, HPC/UHPC [2]); бетоны без макродефектов (Macro Defect-Free Concrete, MDFC [3]); бетоны со скомпенсированной усадкой (Shrinkage Compensated Concrete [4]); порошково-

активированные бетоны (Reactive Powder Concrete, RPC [5]) и многие другие. Стоит отметить, что разработка обозначенных видов бетона с принципиально новыми показателями и/или высокими эксплуатационными свойствами не представляется возможной без использования модификаторов различного состава и назначения. Эффективность такого подхода доказана многочисленными исследованиями российских и зарубежных ученых [6–13].

Среди всего многообразия современных видов бетона выделяются самоуплотняющиеся, научные основы проектирования и практический опыт использования которых в России созданы в АО «НИЦ «Строительство» группой ученых-практиков под руководством С.С. Каприелова [14–16].

Самоуплотняющийся бетон (СУБ) отличается высокой подвижностью смеси и стойкостью к расслоению при низком содержании воды в системе и, как следствие, способностью к заполнению различных матричных форм (опалубки), включая густоармированные элементы. Это обуславливает возможность его применения в широком диапазоне конструкций. Одним из ключевых факторов, сдерживающих масштабное внедрение СУБ в практику строительства, является отсутствие утвержденной нормативной базы, регламентирующей требования к сырьевым компонентам, оценки качества бетонной смеси и готовых конструкций на ее основе. В настоящее время ведется работа по утверждению разработанного НИИЖБ им. А.А. Гвоздева национального стандарта ГОСТ Р «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия» [17]. В этой связи при разработке составов СУБ все еще руководствуются преимущественно европейскими нормами с учетом действующей российской нормативной базы на традиционные бетоны, а также конкретными функциональными требованиями по свойствам бетонной смеси и бетона.

Особенности свойств самоуплотняющейся бетонной смеси и конструкций на ее основе требуют низкого водоцементного отношения, высокой доли дисперсных и порошкообразных компонентов, небольшого расхода крупного заполнителя, значительной доли цементного клея по отношению к заполнителю и др. [18]. Выполнение данных условий гарантирует

формирование композита с высокими технико-эксплуатационными свойствами при сниженной проницаемости и повышенной долговечности.

В зарубежной литературе приводится многообразие способов расчета состава самоуплотняющегося бетона [19]. При этом ключевыми факторами, обеспечивающими формирование бетонной смеси с требуемыми реологическими параметрами (высокая подвижность, сохраняемость без расслоения) и бетона с физико-механическими свойствами (прочность, усадка, долговечность), являются включение в состав бетона функциональных добавок (химических и минеральных), плотность упаковки компонентов, водоцементное соотношение.

Целью настоящей работы являлся подбор состава самоуплотняющегося бетона, используемого для бетонирования монолитных густоармированных конструкций (большеразмерных захваток) контурных стен вспомогательного реакторного здания Курской АЭС.

В качестве сырьевых компонентов в работе использовались: портландцемент ПЦ500 Д0 производства ОАО «Новоросцемент», цементный завод «Пролетарий»; песок мелкий I класса ($M_k=1,55$) карьера «Майская Заря» (Курская обл.), песок средний I класса ($M_k=2,4$) карьера «Латненское месторождение Воронежской области» (ООО «Сибелко», г. Воронеж); щебень гранитный фракции 5–20 мм производства РУПП «Гранит» (г. Микашевичи, Брестская обл.). Соотношение песков в составе комплекса мелких заполнителей подбирали с учетом необходимости формирования плотнейшей упаковки частиц топологическим расчетом. Проектными документами регламентирована необходимость получения бетона для стен толщиной 400 мм: класс по прочности на сжатие – В60; марка по водонепроницаемости – W6; марка по морозостойкости – F100.

В качестве добавок использовали материалы производства ЗАО «НП ЦМИД» (г. Санкт-Петербург): многокомпонентные комплексные порошкообразные добавки для бетона ГПМ (тонкодисперсные смеси на основе солей полиметиленафталинсульфонатов, диоксида кремния и карбонатов), модификаторы 18/1 и 9/12-3; гиперпластификатор ГПМж-Ультра, модификация 17/1.

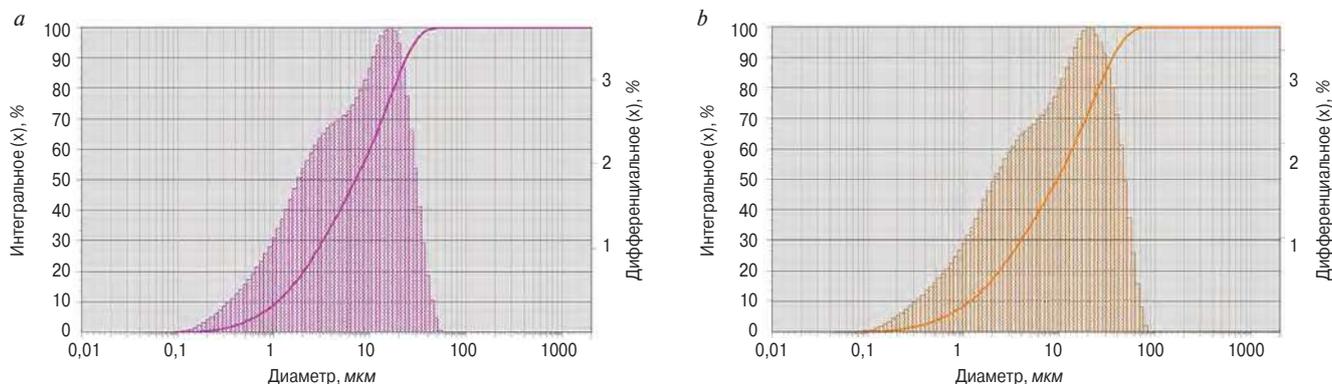


Рис. 1. Гранулометрия порошкообразных модификаторов: а – 18/1; б – 9/12-3
Fig. 1. Granulometry of powdery modifiers: a – 18/1; b – 9/12-3

На первоначальном этапе осуществляли оценку физико-химических свойств (гранулометрия, сорбционная емкость, концентрация активных центров) порошкообразных добавок.

Гранулометрический состав обеих добавок сходен и характеризуется следующим (рис. 1): порошки представляют собой полидисперсные вещества с разбросом размеров частиц в диапазоне 0–100 мкм с преобладанием частиц размерами до 10 мкм (более 70%).

Оценку активности порошков осуществляли методом Запорожца (сорбционная емкость) и индикаторным способом (количество центров адсорбции). Ввиду того, что предлагаемые порошки представляют собой карбонатно-кремнеземистую смесь, для сравнения в работе также изучены свойства порошка минерального известнякового и порошка диатомитового тонкодисперсного.

Согласно полученным данным, общая активность применяемых модифицирующих порошков сопоставима по концентрации активных центров как с инертным (минеральный порошок), так и с активным пуццолановым (диатомит) компонентами (табл. 1). Тем не менее доля кислотных центров Бренстеда как гарантов пуццолановой реакции в среде твердеющего цемента для ГПМ 18/1 и ГПМ 9/12-3 в два раза ниже по сравнению с диатомитовым порошком, что обусловлено составом химических добавок.

Максимальным количеством поглощенного СаО из раствора отличается диатомитовый порошок (табл. 1), что связано с его структурными (аморфизованность) и физическими (высокая гигроскопичность) особенностями. Минимальными значениями характеризуются известняковый порошок и добавка модификации ГПМ 18/1, что хорошо коррелирует с данными по концентрации активных центров. Очевидно, что доля карбонатной составляющей в этом порошке выше, чем в добавке модификации 9/12-3. При этом максимальную способность к поглощению свободного оксида кальция из раствора модификатор ГПМ 9/12-3 демонстрирует уже через 1 ч, тогда как модификатор ГПМ 18/1 только через 5 ч. В этой связи в дальнейшем для разработки состава принята добавка ГПМ 9/12-3.

Подбор начальной дозировки пластифицирующей добавки осуществляли по методике НИИЖБ с использованием мини-конуса. Согласно полученным данным, введение более 2% пластификатора от массы цемента нецелесообразно, поскольку прироста подвижности практически не происходит (рис. 2). При этом совместное использование пластификатора и порошкообразной добавки, несмотря на ее дисперсность, обеспечивает увеличение расплыва конуса на 8% по сравнению с цементным тестом только с пластификатором и в два раза по сравнению с чистым цементным тестом.

Дальнейший подбор состава бетона осуществляли методом математического планирования эксперимента, что обусловлено простотой (возможность минимизации опытов), информативностью (одновременное

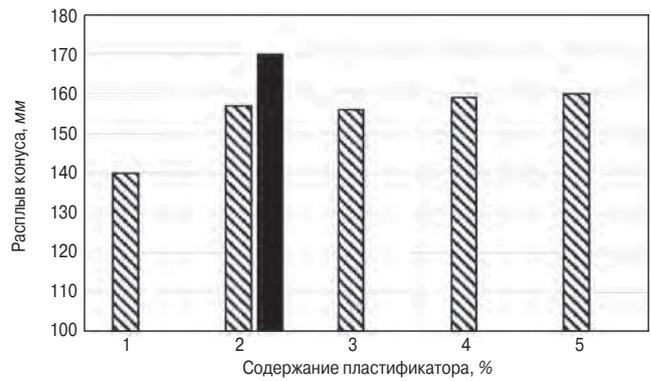


Рис. 2. Подвижность цементного теста в зависимости от состава: ▨ – с пластификатором; ■ – с пластификатором и порошком ГПМ 9/12-3

Fig. 2. The mobility of the cement paste depending on the composition: ▨ – with a plasticizer; ■ – with plasticizer and powder GPM 9/12-3

Таблица 1
Table 1

Активность порошкообразных компонентов
The activity of the powder components

Порошок	Концентрация активных центров, 10 ³ моль/г		Количество поглощенного СаО, мг/г
	общая	кислотных центров Бренстеда	
Диатомитовый	120,7	36,4	146
Минеральный (известняковый)	119,6	6,9	33
ГПМ 18/1	128,3	13	34
ГПМ 9/12-3	122,1	15	47

Таблица 2
Table 2

Варьируемые параметры
Variable parameters

Факторы	Кодированный вид	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
Количество цемента, кг/м ³	X ₁	430	460	490	30
Концентрация пластификатора, %	X ₂	2	3	4	1
Концентрация порошка, %	X ₃	9	13	17	4

менное варьирование множества факторов; выбор обоснованного решения) и возможностью применения для решения широкого спектра задач [20–23]. Предварительно произведен расчет номинального состава бетона в соответствии с ГОСТ 27006–2019 «Бетоны. Правила подбора составов». Соотношение песков в базовом составе составляло $P_{мел}/P_{ср}=1/4$. В качестве факторов варьирования выбраны количество цемента, концентрация пластифицирующей и комплексной добавок (табл. 2). Выходными параметрами служили прочность при сжатии, плотность, расплыв конуса. На основе матрицы планирования были получены образцы бетона и изучены их физико-механические свойства. После статистической компьютерной обработки эмпирических данных

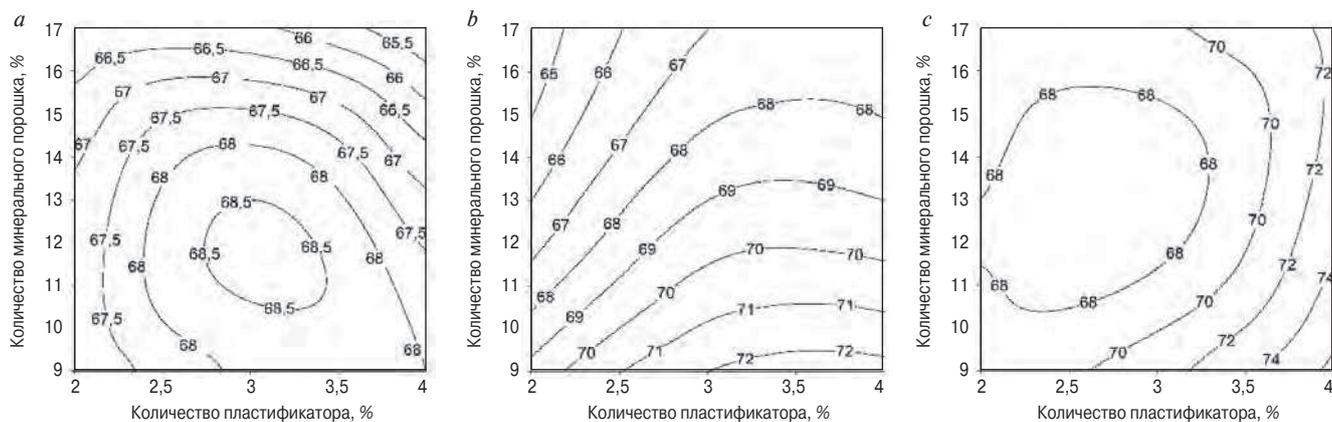


Рис. 3. Распływ конуса бетонной смеси в зависимости от состава и доли цемента: а – 430 кг/м³; б – 460 кг/м³; с – 490 кг/м³
 Fig. 3. Spreading of the concrete mix cone depending on the composition and amount of cement: a – 430 kg/m³; b – 460 kg/m³; c – 490 kg/m³

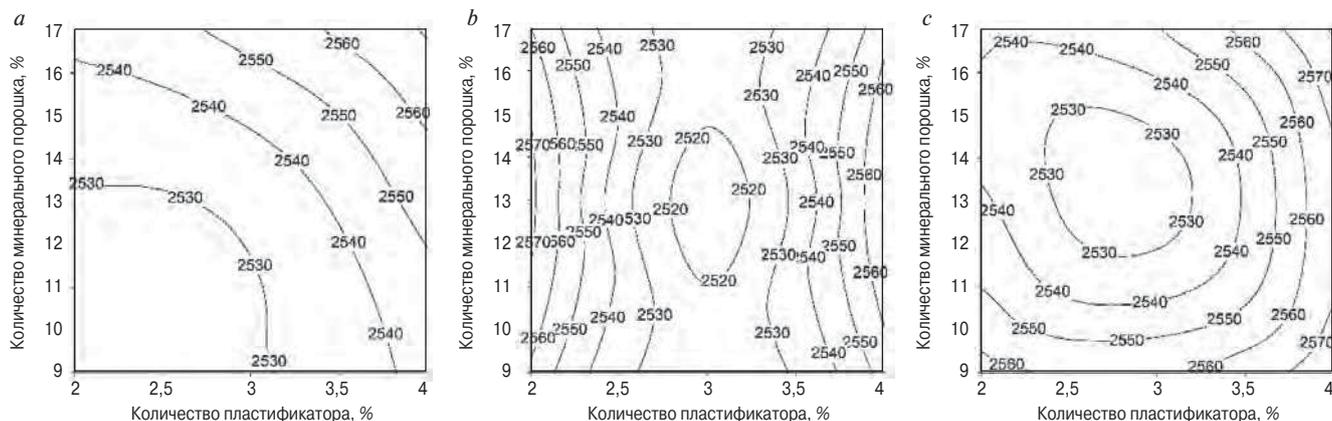


Рис. 4. Плотность бетона в зависимости от состава и доли цемента: а – 430 кг/м³; б – 460 кг/м³; с – 490 кг/м³
 Fig. 4. Density of concrete depending on the composition and amount of cement: a – 430 kg/m³; b – 460 kg/m³; c – 490 kg/m³

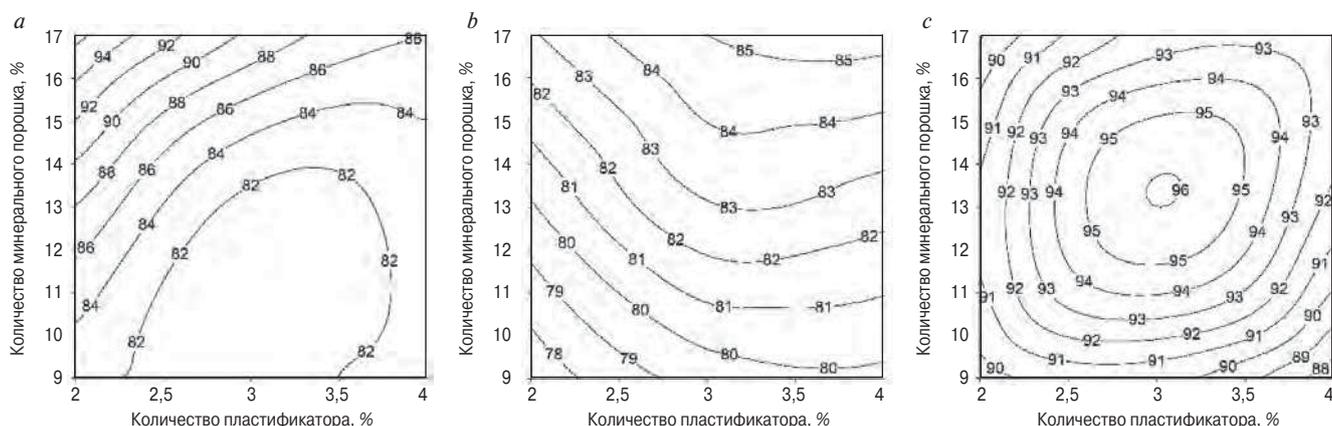


Рис. 5. Прочность бетона в зависимости от состава и доли цемента: а – 430 кг/м³; б – 460 кг/м³; с – 490 кг/м³
 Fig. 5. Strength of concrete depending on the composition and amount of cement: a – 430 kg/m³; b – 460 kg/m³; c – 490 kg/m³

были получены математические модели изменения свойств в зависимости от состава смесей. По уравнениям регрессии произведен анализ влияния факторов варьирования на физико-механические свойства смеси и бетона (рис. 3–5).

Согласно полученным данным, увеличение доли цемента в системе при совокупном увеличении дозировки пластификатора обеспечивает рост подвижности смеси с 67 до 74 см при расходе цемента 430 и 490 кг/м³ соответственно. Рост концентрации

порошкообразной добавки приводит к некоторому снижению подвижности: с 68 до 66 см при расходе цемента 430 кг/м³; с 72 до 65 см – при 460 кг/м³; с 74 до 68 см – при 490 кг/м³. Тем не менее все полученные бетонные смеси характеризуются высокой подвижностью и соответствуют марке по удобоукладываемости SF2/PK2 (по EN [24] / в соответствии с проектом стандарта [17]). При этом водоцементное отношение смесей варьируется в диапазоне 0,28–0,32.

Таблица 3
Table 3

Расход компонентов для самоуплотняющегося бетона
Consumption of components for self-compacting concrete

Состав, мас. %						В/Ц
Цемент	Щебень	Песок мелкий	Песок средний	Пластификатор (от цемента)	Модификатор (от цемента)	
21	43,5	11	24,5	3	17	0,32

Таблица 4
Table 4

Физико-механические свойства самоуплотняющегося бетона
Physical and mechanical properties of self-compacting concrete

Показатель	Значение	Соответствие марке
Предел прочности при сжатии, МПа	97	B75
Водонепроницаемость, МПа	1,4	W14
Морозостойкость, циклы	Более 300	F300

Таблица 5
Table 5

Свойства самоуплотняющейся бетонной смеси рационального состава
Properties of self-compacting concrete mix of rational composition

Показатель	Значение	Норма	Соответствие марке	
			по EN [24]	по проекту стандарта [17]
Вязкость T500, с	13	>2 с	VS2	V2
Время истечения из V-образной воронки, с	14	9–25 с	VF2	V4
Текущность на L-образном коробе	0,11	–	PA2	T2
Устойчивость к расслоению, %	6,4	<15%	SR2	Не более 17,5% для PK2
Объем вовлеченного воздуха, %	1,9	–	–	–

Плотность полученного бетона отличается незначительно в зависимости от варьирования состава (рис. 4), что обусловлено изначальным подбором состава на принципах формирования высочайшей упаковки твердой фазы в объеме. Отличия в значениях показателя не превышают 50 кг/м³: плотность бетона составляет 2530 и 2570 кг/м³ при максимальных дозировках всех компонентов (цемента, пластификатора и порошкообразного модификатора).

Варьирование состава смесей значительно влияет на прочность при сжатии полученных образцов (рис. 5). Так, рост прочности композитов при увеличении концентрации минерального порошка при равном содержании цемента составляет: 15% при расходе цемента 430 кг/м³; 10% – при расходах 460 и 490 кг/м³. При этом возможно получение материалов с прочностью в диапазоне 82–94 МПа при расходе цемента

430 кг/м³; 78–85 МПа – при расходе 460 кг/м³; 88–96 МПа – при расходе цемента 490 кг/м³. Необходимо отметить, что анализ составов при равных расходах цемента и минерального порошка свидетельствует о незначительном влиянии пластифицирующей добавки на конечную прочность. Так, разница в прочности при минимальной и максимальной концентрациях пластификатора в пределах одного состава не превышает 2 МПа. Увеличение дозировки порошкообразного модификатора обеспечивает прирост прочности не менее чем на 5 МПа. Стоит отметить, что в качестве промежуточного контроля оценивалась прочность бетона на 7-е сут твердения, которая составила 80–90% от прочности бетона в возрасте 28 сут.

Комплексный анализ полученных данных позволил выбрать рациональный состав бетона, обеспечивающий получение бетона с требуемыми показателями качества при существенном запасе прочности (табл. 3, 4). Однако полученные номограммы могут быть использованы для решения задач по подбору состава бетона с заданными физико-механическими характеристиками.

Для подтверждения соответствия бетонной смеси, получаемой на основе предложенного состава, требованиям нормативных документов, предъявляемым к самоуплотняющимся растворам, были изучены реологические свойства и технические характеристики смеси: вязкость T500 (по ГОСТ Р 58002–2017/EN 12350–8:2010); время истечения из V-образной воронки (по ГОСТ Р 57815–2017/EN 12350–9:2010); текущность на L-образном коробе (по ГОСТ Р 57816–2017/EN 12350–10:2010); устойчивость к расслоению (по ГОСТ Р 57833–2017/EN 12350–11:2010); объем вовлеченного воздуха. Исследование проводили с использованием испытательного оборудования производства Matest (Италия).

Согласно полученным данным, разработанный состав обеспечивает получение подвижной смеси высокой плотности, стойкой к расслаиванию и отличающейся достаточной сохраняемостью свойств во времени (табл. 5). При этом бетонная смесь соответствует требованиям национального стандарта и европейским нормам.

Таким образом, показана возможность получения самоуплотняющейся бетонной смеси на основе традиционно применяемых сырьевых компонентов с использованием комплекса из органоминерального модификатора и пластификатора с высокой водоредуцирующей способностью. Получены составы самоуплотняющихся смесей тяжелого бетона с высокой подвижностью и устойчивостью к расслаиванию, обеспечивающие получение бетона с пределом прочности при сжатии 85–97 МПа, соответствующим классам B60–B75, с существенным запасом прочности и водонепроницаемостью до W14. Полученные номограммы могут быть использованы в задачах подбора состава прочного и высокопрочного бетона высокого качества.

Список литературы

1. Alos Dushimimana A., Niyonsenga A.A., Nzamurambaho F. A review on strength development of high performance concrete // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 307. 124865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124865>
2. Du J., Meng W., Khayat K. H., Bao Y., Guo P., Lyu Z., Abu-obeidah A., Nassif H., Wang H. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC) // *Composites Part B: Engineering*. 2021. Vol. 224. 109220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220>.
3. Phares B., Freeseaman K. Investigation of Macro-Defect-Free Concrete for ABC including Robotic Construction. February 2018. 31 p. https://abc-utc.fiu.edu/wp-content/uploads/sites/52/2018/03/ISU-Brent-macro-defect-free_Final.pdf
4. Zhan P., He Z. Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 201, pp. 676–690. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.209>.
5. Ahmed S., Al-Dawood Z., Abed F., Mannan M. A., Al-Samarai M. Impact of using different materials, curing regimes, and mixing procedures on compressive strength of reactive powder concrete: A review // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 44. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103238>.
6. Каприелов С.С., Батраков В.Г., Шейнфельд А.В. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива // *Бетон и железобетон*. 1999. № 6. С. 6–10.
7. Гувалов А.А., Аббасова С.И., Кузнецова Т.В. Эффективность модификаторов в регулировании свойств бетонных смесей // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 49–51.
8. Косухин М.М., Косухин А.М. Поверхностные явления в модифицированных цементных дисперсиях и их роль в механизме действия полифункциональных модификаторов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 7. С. 81–87.
9. Тюкавкина В.В., Касиков А.Г., Гуревич Б.И. Структурообразование цементного камня, модифицированного добавкой нанодисперсного диоксида кремния // *Строительные материалы*. 2018. № 11. С. 31–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-765-11-31-35>
10. Толстой А.Д. Мелкозернистый бетон повышенной прочности // *Строительные материалы и изделия*. 2020. Т. 3. № 1. С. 39–43.
11. Успанова А.С., Хаджиев М.Р., Исмаилова З.Х., Баснукаев И.Ш. Анализ влияния методов введения органоминеральной добавки в строительные растворы на мелких песках // *Строительные материалы и изделия*. 2021. Т. 4. № 4. С. 32–40.
12. Лесовик В.С., Федюк Р.С., Гридчин А.М., Мурали Г. Повышение эксплуатационных характеристик защитных композитов // *Строительные*

References

1. Alos Dushimimana A., Niyonsenga A.A., Nzamurambaho F. A review on strength development of high performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 307. 124865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124865>
2. Du J., Meng W., Khayat K. H., Bao Y., Guo P., Lyu Z., Abu-obeidah A., Nassif H., Wang H. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B: Engineering*. 2021. Vol. 224. 109220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220>
3. Phares B., Freeseaman K. Investigation of Macro-Defect-Free Concrete for ABC including Robotic Construction. February 2018. 31 p. https://abc-utc.fiu.edu/wp-content/uploads/sites/52/2018/03/ISU-Brent-macro-defect-free_Final.pdf
4. Zhan P., He Z. Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 201, pp. 676–690. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.209>
5. Ahmed S., Al-Dawood Z., Abed F., Mannan M. A., Al-Samarai M. Impact of using different materials, curing regimes, and mixing procedures on compressive strength of reactive powder concrete: A review. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 44. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103238>
6. Kaprielov S.S., Batrakov V.G., Shejfel'd A.V. Modified concretes of the new generation: reality and perspective. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 1999. No. 6, pp. 6–10. (In Russian).
7. Guvalov A.A., Abbasova S.I., Kuznecova T.V. Efficiency of modifiers when regulating properties of concrete mixes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 7, pp. 49–51. (In Russian).
8. Kosuhin M.M., Kosuhin A.M. Surface phenomena in modified cement dispersions and their role in the mechanism of action of polyfunctional modifiers. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2017. No. 7, pp. 81–87. (In Russian) DOI: [10.12737/article_5940f0196c3d00.35349003](https://doi.org/10.12737/article_5940f0196c3d00.35349003)
9. Tyukavkina V.V., Kasikov A.G., Gurevich B.I. Structure formation of cement stone modified with additive of nano-disperse silicon dioxide. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 11, pp. 31–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-765-11-31-35> (In Russian).
10. Tolstoj A.D. Fine-grained high-strength concrete. *Stroitel'nye materialy i izdelija*. 2020. Vol. 3, No. 1, pp. 39–43. (In Russian).
11. Uspanova A.S., Hadzhiev M.R., Ismailova Z.H., Basnukaev I.Sh. Analysis of the effect of methods of introduction of organomineral additives into mortars on fine sands. *Stroitel'nye materialy i izdelija*. 2021. Vol. 4. No. 4, pp. 32–40. (In Russian). DOI: [10.34031/2618-7183-2021-4-4-32-40](https://doi.org/10.34031/2618-7183-2021-4-4-32-40)
12. Lesovik V.S., Fediuk R.S., Gridchin A.M., Murali G. Improving the operational characteristics of protective composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials].

- материалы. 2021. № 9. С. 32–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-32-40>
13. Строкова В.В., Лакетич С.К., Нелубова В.В., Женмао Йе. Оксид графена как модификатор цементных систем: анализ состояния и перспективы развития // *Строительные материалы*. 2021. № 1–2. С. 37–89. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-37-89>
 14. Батудаева А.В., Кардумян Г.С., Каприелов С.С. Высокопрочные модифицированные бетоны из самовыравнивающихся смесей // *Бетон и железобетон*. 2005. № 4. С. 14–18.
 15. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В., Кардумян Г.С., Ургапов В.И. Опыт возведения уникальных конструкций из модифицированных бетонов на строительстве комплекса «Федерация» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2006. № 8. С. 20–22.
 16. Каприелов С.С., Чилин И.А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // *Строительные материалы*. 2013. № 7. С. 28–30.
 17. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Арзуманов И.А., Чилин И.А. Новый национальный стандарт на самоуплотняющиеся бетонные смеси // *Вестник НИЦ Строительство*. 2021. № 3 (30). С. 30–40.
 18. Ramkumar K.B., Kannan Rajkumar P.R., Ahmmad Sh.N., Jegan M. A Review on performance of self-compacting concrete – use of mineral admixtures and steel fibres with artificial neural network application // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 261. 120215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120215>
 19. Shi C., Wu Z., Lv K., Wu L. A review on mixture design methods for self-compacting concrete // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 84, pp. 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.079>
 20. Свергузова С.В., Гончарова Е.Н., Буракова Ю.В. Исследование процесса биокоррозии строительных материалов методом математического планирования эксперимента // *Строительные материалы*. 2001. № 1. С. 34–35.
 21. Долотова Р.Г., Верещагин В.И., Смирнская В.Н. Определение составов ячеистых бетонов различной плотности при использовании полевошпатово-кварцевых песков методом математического планирования // *Строительные материалы*. 2012. № 12. С. 16–19.
 22. Зыонг Тхань Куй, Королев Е.В., Иноземцев А.С. Комплексное модифицирование легких бетонов на полых микросферах для технологии 3D-печати // *Бетон и железобетон*. 2021. № 3 (605). С. 25–29.
 23. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Чивикова Е.В. Использование опал-кристобалит-тридимитового микронаполнителя в тяжелом бетоне // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2020. № 2. С. 8–17.
 24. Specification & Guidelines for Self-Compacting Concrete. EFNARC. February 2002. 32 p.
 2021. No. 9, pp. 32–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-32-40>
 13. Strokov V.V., Laketich S.K., Nelubova V.V., Zhengmao Ye. Graphene oxide as a modifier for cement systems: analysis of the state and development prospects. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 1–2, pp. 37–89. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-37-89>
 14. Batudaeva A.V., Kardumjan G.S., Kapriellov S.S. High-strength modified concretes from self-leveling mixtures. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 2005. No. 4, pp. 14–18. (In Russian).
 15. Kapriellov S.S., Shejnfel'd A.V., Kiseleva Ju.A., Prigozhenko O.V., Kardumjan G.S., Urgapov V.I. Erection of unique structures made of modified concrete and used for construction of the complex “Federation” MMDTS “Moscow-City”. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2006. No. 8, pp. 20–22. (In Russian).
 16. Kapriellov S.S., Chilin I.A. Ultra-high-strength self-compacting fiber concrete for monolithic structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 7, pp. 28–30. (In Russian).
 17. Kapriellov S.S., Shejnfel'd A.V., Arzumanov I.A., Chilin I.A. New national standard for self-compacting concrete mixes. *Vestnik NIC Stroitel'stvo*. 2021. No. 3 (30), pp. 30–40. (In Russian) DOI: 10.37538/2224-9494-2021-3(30)-30-40
 18. Ramkumar K.B., Kannan Rajkumar P.R., Ahmmad Sh.N., Jegan M. A Review on performance of self-compacting concrete – use of mineral admixtures and steel fibres with artificial neural network application. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 261. 120215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120215>
 19. Shi C., Wu Z., Lv K., Wu L. A review on mixture design methods for self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 84, pp. 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.079>
 20. Svergzuzova S.V., Goncharova E.N., Burakova Ju.V. Study of the process of biocorrosion of building materials by the method of mathematical planning of the experiment. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2001. No. 1, pp. 34–35. (In Russian).
 21. Dolotova R.G., Vereshhagin V.I., Smirenskaja V.N. Determination of cellular concrete compositions of various densities using feldspar-quartz sands by mathematical planning. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 12, pp. 16–19. (In Russian).
 22. Duong Thanh Qui, Korolev E.V., Inozemcev A.S. Complex modification of light concretes on hollow microspheres for 3D printing technology. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2021. No. 3 (605), pp. 25–29. (In Russian).
 23. Lukutcova N.P., Pykin A.A., Chivikova E.V. Use of opal-crystobalite-tridimite micro-filler in dense aggregate concrete. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2020. No. 2, pp. 8–17. (In Russian). DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-8-17
 24. Specification & Guidelines for Self-Compacting Concrete. EFNARC. February 2002. 32 p.

А.В. КУРШПЕЛЬ, канд. техн. наук (a.kurshpel@yandex.ru),

В.Х. КУРШПЕЛЬ, канд. техн. наук (vkurshpel@yandex.ru)

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, институт Строительства и Архитектуры (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17)

О механизме разрушения защитного слоя бетона от коррозии арматуры

Целью представленного исследования стало привлечение внимания к серьезному дефекту железобетонных конструкций, работающих в условиях агрессивной окружающей среды, – разрушению защитного слоя бетона от коррозии арматурных стержней. Защитный слой бетона толщиной 10–30 мм призван обеспечивать сохранность стальной арматуры от агрессивных факторов окружающей среды, однако со временем под действием различных агрессивных факторов его способность защищать арматуру от коррозии заметно снижается. Стальная арматура, покрываясь слоем коррозии, оказывает существенное давление на защитный слой бетона, в результате чего между арматурой и бетоном образуются трещины различной ориентации, что способствует быстрому проникновению агрессивных факторов к арматуре, к увеличению интенсивности коррозии и в дальнейшем к отрыву защитного слоя бетона. Коррозия арматуры на открытом воздухе происходит еще более интенсивно, что приводит к быстрому уменьшению площади рабочего сечения арматуры и преждевременному обрушению конструкций от действующей нагрузки. Для устранения указанного недостатка в защитный слой бетона предлагается устанавливать стекловолоконные сетки, способные повысить трещиностойкость бетона при агрессивных внешних воздействиях и препятствовать отрыву защитного слоя бетона от железобетонной конструкции (Патент РФ № 2744905 от 26 декабря 2018). Указанное мероприятие позволит создать железобетонные конструкции повышенной надежности и долговечности.

Ключевые слова: бетон, защитный слой, арматура, коррозия, напряжение, трещины, стекловолоконные сетки, надежность, долговечность.

Для цитирования: Куршпель А.В., Куршпель В.Х. О механизме разрушения защитного слоя бетона от коррозии арматуры // *Строительные материалы*. 2021. № 12. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-55-60>

A.V. KURSHPEL, Candidate of Sciences (Engineering), (a.kurshpel@yandex.ru),

V. Kh. KURSHPEL, Candidate of Sciences (Engineering), (vkurshpel@yandex.ru)

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Institute of Civil Engineering and Architecture (17, Mira Street, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation)

About the Mechanism of Destruction of the Protective Layer of Concrete Due to Reinforcement Corrosion

The purpose of the presented study was to draw attention to a serious defect in reinforced concrete structures operating under aggressive environment conditions – to the destruction of the protective layer of concrete due to corrosion of reinforcing rods. The protective layer of concrete with a thickness of 10-30 mm is designed to ensure the safety of steel reinforcement from aggressive environmental factors, however, over time, under the impact of various aggressive factors, its ability to protect the reinforcement from corrosion is noticeably reduced. Steel reinforcement, being covered with a layer of corrosion, exerts significant pressure on the protective layer of concrete, as a result, cracks of various orientations form between the reinforcement and concrete, this contributes to the rapid penetration of aggressive factors to the reinforcement, to an increase in the intensity of corrosion and further to the separation of the protective layer of concrete. Corrosion of the reinforcement in the open air occurs even more intensively, which leads to a rapid decrease in the area of the working section of the reinforcement and premature collapse of structures from the operating load. To eliminate this drawback, it is proposed to install fiberglass nets in the protective layer of concrete that can increase the crack resistance of concrete under aggressive external impacts and prevent the separation of the protective layer of concrete from the reinforced concrete structure (RF patent No. 2744905 of December 26, 2018). This measure will make it possible to create reinforced concrete structures of increased reliability and durability.

Keywords: concrete, protective layer, reinforcement, corrosion, stress, cracks, fiberglass meshes, reliability, durability.

For citation: Kurshpel A.V., Kurshpel V.Kh. About the mechanism of destruction of the protective layer of concrete due to reinforcement corrosion. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 12, pp. 55–60. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-55-60>

Причины образования коррозии на поверхности арматурных стержней в железобетонных конструкциях

Одной из важных причин снижения надежности и долговечности железобетонных конструкций, работающих в агрессивных условиях окружающей среды, является разрушение защитного слоя бетона от образования коррозии на поверхности стальной арматуры. Внешний защитный слой бетона толщиной 10–30 мм на короткое время защищает железобетонные конструкции от внешних воздействий, чему

способствует щелочная составляющая бетонной смеси, возникающая при изготовлении конструкций, определяемая показателем $pH=12-14$, который с течением времени снижается по разным причинам. При $pH<8$ среда вокруг стальной арматуры становится нейтральной, а при более низких значениях $pH\leq 6$ переходит в кислую, что существенно ускоряет процесс развития коррозии в арматуре. Изменение химического состава бетона с течением времени, в том числе при воздействии углекислого газа CO_2 окружающего воздуха, при взаимодействии с которым в бе-



Рис. 1. Разрушение защитного слоя бетона в растянутой зоне железобетонных конструкций в подвале здания склада сельскохозяйственной продукции после 15 лет эксплуатации (автор А.В. Куршпель)

Fig. 1. Destruction of the protective layer of concrete in the tensioned zone of reinforced concrete structures in the basement of the building of the warehouse of agricultural products after 15 years of operation (author A.V. Kurshpel)

тоне уменьшается содержание щелочной среды, создаваемой известью CaOH_2 , которая защищает арматуру от коррозии. При карбонизации бетона по схеме $\text{CaOH}_2 + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ выделяется твердый нейтральный осадок CaCO_3 (мрамор, мел) и вода, являющаяся базой для образования кислот, способствующих коррозии стальной арматуры.

Разрушению защитного слоя бетона также способствуют агрессивные факторы: а) усадка и ползучесть бетона; б) ионы хлора (Cl^-), содержащиеся в добавках для ускорения твердения бетона, образующие соединения: $\text{CaCl}_2 + \text{CaOH}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{CaO} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, что ускоряет развитие коррозии на поверхности арматуры; в) электрохимическая коррозия, возникающая в результате перехода выделяемых атомов металла от анода к катоду, образует сплошной слой ржавчины на поверхности арматурных стержней; г) цикличность климатических воздействий, мороз—оттепель способствуют созданию благоприятной среды для коррозии арматуры; д) агрессивные факторы окружающей среды, в том числе выделяемые в процессе производства продукции; е) другие причины, приводящие к образованию трещин и ухудшению первоначального качества защитного слоя бетона.

В результате с течением времени создается возможность все большего проникновения к арматуре агрессивных факторов, вызывающих коррозию арматуры со стороны тонкого защитного слоя. Продукты коррозии арматуры, увеличиваясь в объеме, создают растягивающие напряжения в бетоне вокруг арматурных стержней, что приводит к расширению существующих и образованию новых трещин. Трещины в защитном слое бетона с раскрытием 0,3 мм и более приводят к ускоренному доступу воды и кислорода к арматуре и к интенсивному увеличению объема коррозии на арматурных стержнях. В результате через непродолжительное время происходит разрушение защитного слоя бетона с оголением арматуры [1, 2].



Рис. 2. Вид трещины отрыва защитного слоя бетона в растянутой зоне главной балки и оголение арматуры второстепенной балки монолитного перекрытия склада сельскохозяйственной продукции при разрушении бетона от коррозии арматуры (автор А.В. Куршпель)

Fig. 2. View of the crack of tearing off the protective layer of concrete in the tensioned zone of the main beam and the exposure of the reinforcement of the secondary beam of the monolithic floor of the warehouse of agricultural products during the destruction of concrete from corrosion of reinforcement (author A.V. Kurshpel)



Рис. 3. Вид продольных трещин в ребрах П-образных сборных железобетонных плит в местах расположения напрягаемой арматуры и частичное обрушение защитного слоя бетона от коррозии арматуры в здании склада сельскохозяйственной продукции (автор А. В. Куршпель)

Fig. 3. Type of longitudinal cracks in the ribs of P-shaped prefabricated reinforced concrete slabs at the locations of prestressing reinforcement and partial collapse of the protective layer of concrete from corrosion of reinforcement in the building of an agricultural product warehouse (author A.V. Kurshpel)

Примеры разрушения защитного слоя бетона в железобетонных конструкциях, работающих в агрессивных условиях окружающей среды, от коррозии стальной арматуры представлены на рис. 1—3.

Расчет усилий, образующих трещины в защитном слое бетона при развитии коррозии на поверхности арматурных стержней

Первые трещины от коррозии арматуры возникают в растянутой зоне защитного слоя от раскалывания бетона по вертикали вдоль арматурных стержней, где толщина окружающего бетона меньше, чем на других участках поперечного сечения конструкции. Для расчета величины усилия раскалывания бетона арматурным стержнем со слоем коррозии на

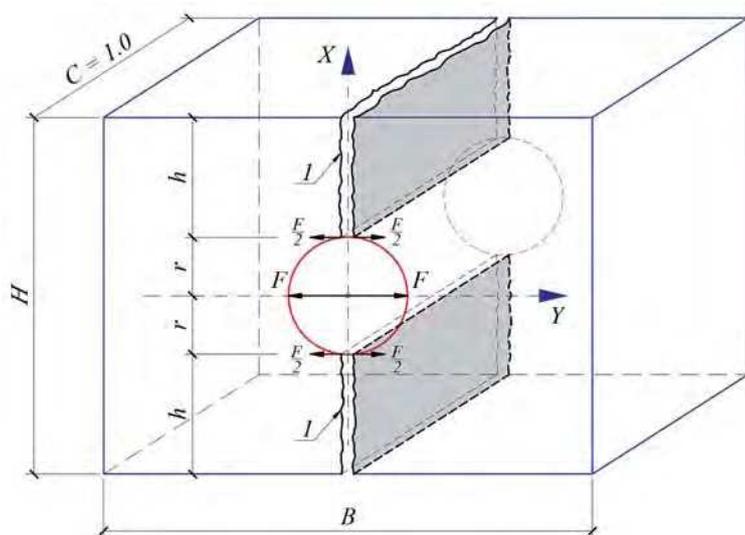


Рис. 4. Условный образец для расчета усилия раскалывания бетона арматурным стержнем при воздействии нарастающего слоя коррозии: $r=10$ мм – радиус условного арматурного стержня; $h=20$ мм – защитный слой бетона; 1 – трещина раскалывания бетона

Fig. 4. Conditional sample for calculating the force of splitting concrete by a reinforcing bar when exposed to a growing layer of corrosion: $r=10$ mm – the radius of the conditional reinforcing bar; $h=20$ mm – concrete protective layer; 1 – concrete splitting crack

его поверхности рассмотрен условный образец с размером поперечного сечения $B \times H$, где $B > H$, из бетона класса В25, длиной $C=1$ м, армированный стержнем диаметром 20 мм, имеющий толщину защитного слоя 20 мм с двух сторон (рис. 4).

С увеличением диаметра арматуры вследствие нарастающей коррозии на поверхности арматурного стержня возникает напряженное состояние в бетоне, окружающем арматуру, которое приводит к образованию трещин. В рассматриваемом случае наиболее опасным является сечение бетона по меньшему размеру, равному высоте защитного слоя до арматуры ($h=0,02$ м). Общая площадь поперечного сечения бетона $A_{bt}=0,02 \cdot 2=0,04$ м². Величина напряжения раскалывания равна нормативному сопротивлению бетона ($R_{bt,n}=1550$ кН/м²), умноженному на площадь поперечного сечения разрыва образца (СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01–2003»).

$$F = R_{bt,n} \cdot A_{bt} = 1550 \cdot 0,04 \cdot 1 = 62 \text{ кН.}$$

Напряженное состояние бетона вокруг арматурного стержня, подверженного коррозии

В представленном случае ситуация с напряженным состоянием в бетоне, окружающем арматуру, сходна с задачей Ламе–Гадолина о расчете напряжений в стенке толстого цилиндра, который испытывает внутреннее давление [4]. Для расчета напряжений, возникающих в бетоне вокруг стержня, представлен условный бетонный образец в виде толстого цилиндра радиусом 30 мм с установленным по оси условным арматурным стержнем радиусом 10 мм (рис. 5).

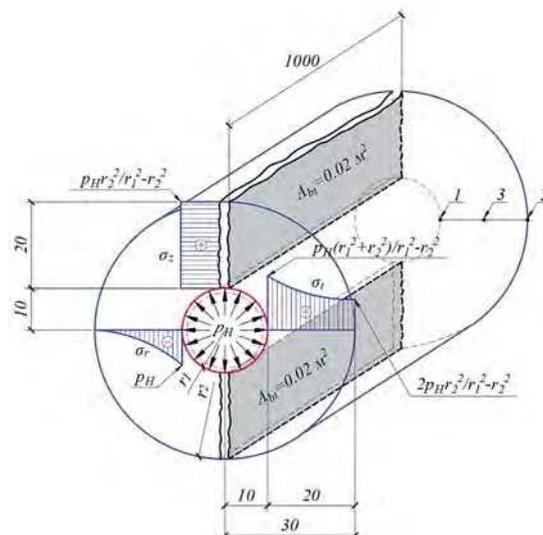


Рис. 5. Схема напряженного состояния условного цилиндрического образца при раскалывании бетона внутренним давлением от коррозии арматурного стержня: 1 – поверхность арматурного стержня; 2 – поверхность бетонного цилиндра; 3 – середина толщины защитного слоя бетона

Fig. 5. Diagram of the stress state of a conventional cylindrical sample is split by internal pressure from corrosion of the reinforcing bar: 1 – surface of the reinforcing bar; 2 – surface of a concrete cylinder; 3 – the middle of the concrete cover

Величина внутреннего давления от коррозии арматуры на окружающий бетон равна:

$$p = F/A_{bt} = 62 \cdot 0,02 = 3100 \text{ кН/м}^2,$$

где $A_{bt} = 1 \cdot 2 \cdot r = 1 \cdot 2 \cdot 0,01 = 0,02$ м².

Наибольшие растягивающие напряжения бетона в точке 1 на внутренней поверхности цилиндрического образца (r_1 и r_2 в см) равны:

$$\begin{aligned} \sigma_B &= p(r_1^2 + r_2^2)/(r_2^2 - r_1^2) = \\ &= 3100 \cdot (1^2 + 3^2)/(3^2 - 1^2) = +3875 \text{ кН/м}^2. \end{aligned}$$

Величина растягивающих напряжений бетона на наружной поверхности цилиндрического образца в точке 2:

$$\sigma_H = 2p \cdot r_2^2/(r_2^2 - r_1^2) = 2 \cdot 3100/(3^2 - 1^2) = +775 \text{ кН/м}^2.$$

Растягивающие напряжения бетона посередине цилиндрического образца в точке 3 определены по формуле:

$$\begin{aligned} \sigma_{cp} &= [(\sigma_B - p_1)/2 + (\sigma_B + p_1)/2] \cdot r_1^2/r_2^2 = \\ &= [(3875 - 3100)/2 + (3875 + 3100)/2] \cdot 1^2/2^2 = 1259,4 \text{ кН/м}^2. \end{aligned}$$

Представленные расчеты показывают, что в вершине трещин раскалывания, возникших от давления слоя коррозии, создается концентрация напряжений в растянутом бетоне, значительно превышающая величину нормативного сопротивления бетона класса В25 на осевое растяжение $R_{bt}=1550$ кН/м², при котором образуются трещины раскалывания.

Схема образования трещин отрыва в бетоне вокруг арматурного стержня показана на рис. 6.

Усилие, действующее на участок защитного слоя, отделенного от массива бетона трещинами раскалывания и отрыва, составляет:

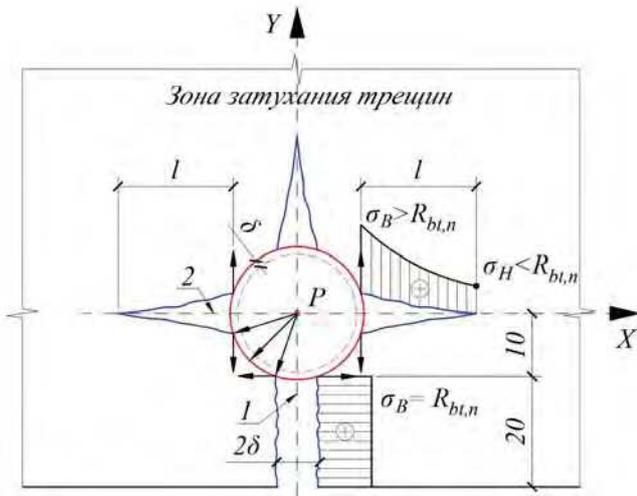


Рис. 6. Схема образования трещин отрыва в защитном слое бетона: 1 – трещина раскалывания; 2 – трещина отрыва; δ – ширина раскрытия трещин

Fig. 6. Scheme of formation of tear-off cracks in the protective layer of concrete: 1 – splitting crack; 2 – tear-off crack; δ – crack opening width

$$F_1 = p_1 \cdot s = 3100 \cdot 0,0157 = 48,7 \text{ кН,}$$

где $s = \pi \cdot r_1 / 2 = 3,14 \cdot 0,01 / 2 = 0,0157$ – четверть окружности стержня.

Напряжение в бетоне защитного слоя вокруг арматурного стержня с учетом концентрации напряжений равно:

$$\sigma_{bt} = F_1 / A_1 = 48,7 / 0,02 = 2435 \text{ кН/м}^2 > R_{bt,n} = 1550 \text{ кН/м}^2.$$

При указанном соотношении напряжений σ_{bt} и $R_{bt,n}$ трещины в растянутой зоне бетона вокруг арматурного стержня образуются.

Длину трещин отрыва в направлении оси X рассчитывают методами механики разрушения с учетом критического коэффициента интенсивности напря-

жений K_{1c} , который связан с образованием трещин отрыва, когда поверхности (берега) трещин расходятся в противоположных направлениях. В формулах для определения напряжений вблизи кончика трещины, в момент локального разрушения, коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} считается постоянной величиной для конкретного материала. Так, для бетона класса В25 коэффициент K_{1c} равен $0,42 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, табл. 11.3 [5].

Расчетная длина трещины отрыва в защитном слое бетона в момент возникновения зависит от величины действующего усилия, геометрических размеров образца и от значения критического коэффициента интенсивности напряжения. Расчет длины трещины отрыва выполнен по формуле (11.3) [5]:

$$L_T = (0,5 \cdot F / 1,25 \cdot h \cdot K_{1c})^2 = (0,5 \cdot 0,062 / 1,25 \cdot 1 \cdot 0,42)^2 = 0,035 \text{ м} = 3,5 \text{ см,}$$

где $F = 62 \text{ кН}$ – усилие образования трещины разрыва; $K_{1c} = 0,42 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ – расчетное значение критического коэффициента интенсивности напряжений; $h = 1 \text{ м}$ – длина условного бетонного образца.

Разрушение защитного слоя бетона в железобетонных конструкциях от коррозии арматуры

В железобетонных конструкциях – балках, плитах, колоннах стальную арматуру в подавляющем большинстве случаев устанавливают с шагом 100–300 мм между осями стержней. После возникновения трещин раскалывания и трещин отрыва защитный слой бетона в поперечном сечении элемента разделяется на отдельные фрагменты, которые воспринимают давление от нарастающего слоя коррозии на арматурных стержнях и от собственного веса самих бетонных фрагментов. Схема разрушения защитного слоя бетона после образования трещин от коррозии арматуры показана на рис. 7.

Выделенные трещинами фрагменты защитного слоя бетона удерживаются в проектом положении за счет работы растянутого бетона на отрыв на участках между трещинами, в зависимости от расстояния между стержнями: при малом расстоянии произойдет отрыв по горизонтали. Поскольку бетон плохо работает на растяжение, а слой коррозии на поверхности арматурных стержней со временем постепенно нарастает, площадь растянутого бетона постепенно уменьшается, а масса нависающих участков защитного слоя около арматурных стержней возрастает. Долговечность такой системы с течением времени резко падает, что приводит к разрушению защитного слоя бетона с оголением арматуры.

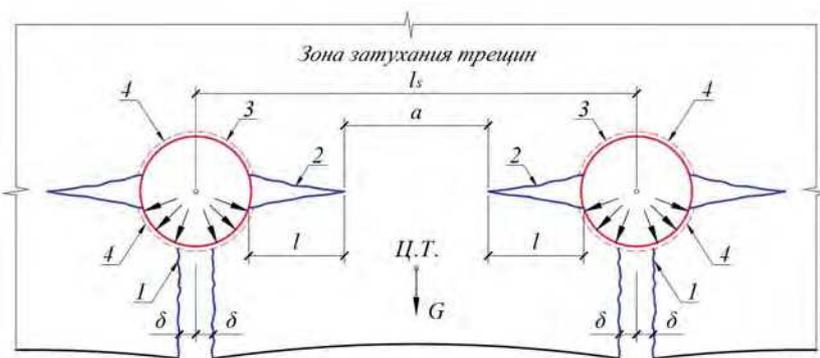


Рис. 7. Схема разрушения защитного слоя бетона при образовании трещин от коррозии арматуры на поверхности арматурных стержней: a – ширина неразрушенного участка бетона, работающего на отрыв; 1 – трещина раскалывания; 2 – трещина отрыва; 3 – слой коррозии; 4 – зоны давления слоя коррозии на участки бетона между трещинами; l_s – расстояние между центрами тяжести арматурных стержней; δ – ширина раскрытия трещин раскалывания

Fig. 7. Scheme of destruction of a protective layer of concrete during the formation of cracks from corrosion of reinforcement on the surface of reinforcing bars: a – width of an undisturbed section of concrete, working for separation; 1 – splitting crack; 2 – separation crack; 3 – corrosion layer; 4 – pressure zones of the corrosion layer on the concrete sections between cracks; l_s – distance between the centers of gravity of the reinforcing bars; δ – the width of the opening of the splitting cracks

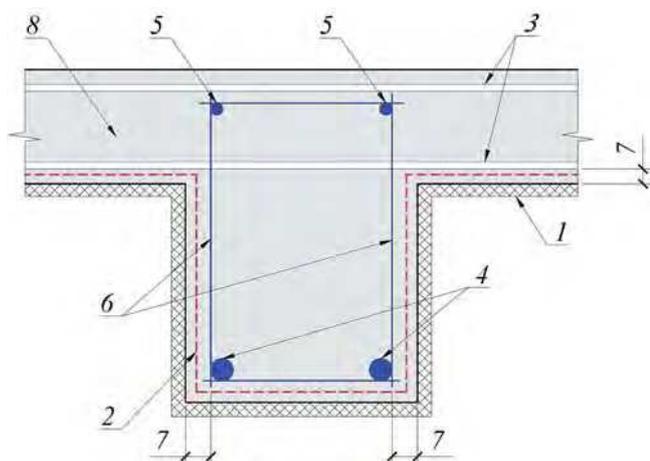


Рис. 8. Схема расположения стекловолоконных сеток в защитном слое бетона: 1 – форма изделия; 2 – стекловолоконная сетка; 3 – арматура плиты перекрытия; 4 – расчетная арматура в растянутой зоне балки; 5 – арматура в сжатой зоне балки; 6 – поперечная арматура балки; 7 – защитный слой бетона; 8 – бетонная смесь

Fig. 8. Layout of fiberglass meshes in a protective layer of concrete: 1 – product shape; 2 – fiberglass mesh; 3 – reinforcement of the floor slab; 4 – design reinforcement in the tensile zone of the beam; 5 – reinforcement in the compressed zone of the beam; 6 – transverse reinforcement of the beam; 7 – protective concrete layer; 8 – concrete mix

Борьба с образованием трещин в защитном слое бетона

Авторами статьи разработан способ борьбы с образованием трещин в защитном слое железобетонных конструкций. Сущность способа состоит в следующем: при изготовлении железобетонных конструкций, до установки стальной арматуры в проектное положение, на поддоны и борта форм устанавливают сетки из стекловолокна, обладающие высокой прочностью на растяжение и стойкостью к агрессивным средам; сетки располагаются в защитном слое бетона, не выходя за его пределы (рис. 8) [6].

Использование неметаллической арматуры в конструкциях из бетона активно началось с середины прошлого века. За это время были подобраны щелочестойкие волокна из материалов высокой прочности, пригодные для армирования бетона, и связующие составы, имеющие хорошую адгезию к волокну и бетону [7].

Одним из путей повышения надежности и долговечности строительных конструкций для промышленного, сельскохозяйственного и энергетического строительства считается использование стеклопластиковой арматуры (СПА). По сравнению со стальной арматурой она обладает рядом преимуществ, к которым относятся: высокая коррозионная стойкость, диэлектрическая способность, немагнитность, радиопрозрачность [8].

В настоящее время проводятся более глубокие исследования взаимодействия неметаллической арматуры в наномодифицированной портландцементной матрице с целью рационального ее использования в конструкциях из бетона [9].

Композитную арматуру, в том числе из стекловолоконных материалов, применяют для усиления и

восстановления железобетонных конструкций в стадии эксплуатации [10].

В настоящее время стекловолоконные сетки широко используют в строительной практике для увеличения несущей способности штукатурных отделочных слоев, наносимых на строительные конструкции для защиты от внешних воздействий (ГОСТ 55225–2012 «Сетки из стекловолокна фасадные армирующие щелочестойкие. Технические условия»). Стекловолоконные сетки устойчивы к агрессивным воздействиям, обладают хорошей адгезией к бетонным средам, предотвращают развитие трещин, имеют невысокую стоимость [11].

Армирование штукатурных слоев стекловолоконными сетками выполняют для недопущения появления трещин, при механических воздействиях на конструкции, а также для защиты от негативного влияния агрессивных факторов окружающей среды. В результате улучшается качество строительных конструкций, возрастают сроки их эксплуатации (СП 31-111–2004 «Применение стекловолоконных сеток и армирующих лент при строительстве зданий»).

Стекловолоконные сетки, расположенные в защитном слое бетона железобетонных конструкций, в стадии эксплуатации не подвергаются непосредственному воздействию окружающей среды, а их нормативная прочность при растяжении (750–1200 МПа) в сравнении с низкой прочностью бетона в растянутой зоне конструкций (1,05–1,5 МПа) фактически исключает появление трещин при различных внешних воздействиях. В изгибаемых элементах стекловолоконные сетки, расположенные в защитном слое, частично заходящие в сжатую зону бетона, создают прочную обойму конструкции, препятствующую образованию трещин между арматурой и бетоном, а также отрыву защитного слоя бетона от арматуры. Кроме того, стекловолоконные сетки в защитном слое противодействуют растяжению бетона от усадки и ползучести, препятствуя образованию трещин.

Выводы

1. Образование продуктов коррозии на поверхности арматурных стержней в железобетонных конструкциях, работающих в условиях агрессивной окружающей среды, нередко приводит к досрочному разрушению защитного слоя бетона, существенно снижает надежность и долговечность конструкций. Поэтому защита железобетонных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных факторов окружающей среды, от преждевременного разрушения является актуальной задачей.

2. Разрушение защитного слоя бетона от нарастающей коррозии арматуры начинается с образования вертикальных трещин раскалывания и появления горизонтальных трещин отрыва по обе стороны от арматурных стержней.

3. В результате появления трещин раскалывания и трещин отрыва защитный слой бетона распадается

на отдельные фрагменты по длине шага арматурных стержней, которые испытывают постоянное давление от постепенно нарастающего слоя коррозии и от собственной массы фрагмента, выделенного трещинами. Поскольку положение фрагмента защитного слоя бетона после образования трещин удерживается только горизонтальным участком бетона между трещинами отрыва, работающим на растяжение или изгиб в зависимости от расположения арматурных стержней в растянутой зоне, несущая способность его быстро падает и происходит разрушение бетона с оголением арматуры.

4. Установка стекловолоконных сеток в защитном слое бетона сдерживает образование и развитие трещин, препятствует проникновению агрессивных факторов окружающей среды к арматуре, исключает причины ускоренного развития коррозии на поверхности арматурных стержней, а также полный отрыв защитного слоя бетона от арматуры. В результате становится возможным создание железобетонных конструкций повышенной надежности и долговечности.

Список литературы

1. Алексеев С.Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне. М.: Стройиздат, 1968. 231 с.
2. Васильев А.И. Оценка коррозионного износа рабочей арматуры в балках пролетных строений автодорожных мостов // *Бетон и железобетон*. 2000. № 2. С. 20–23.
3. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Госстройиздат, 1990. 320 с.
4. Иванов Н.И. Сборник задач по сопротивлению материалов. М.: Гостехиздат, 1956. 352 с.
5. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей. М.: Высшая школа, 1991. 287 с.
6. Патент РФ 2744905 *Способ повышения надежности и долговечности железобетонных конструкций* / Куршпель В.Х., Куршпель А.В. Заявл. 29.12.2018. Оpubл. 17.03.2021.
7. Давидюк А.Н., Спивак Н.А. Применение высокопрочных композитов для усиления железобетонных конструкций. // *Бетон и железобетон*. 2016. № 2. С. 13–16.
8. Вильдавский Ю.М., Асланова Л.Г. Применение стеклопластиковой арматуры в бетонах специального назначения. Коррозионная стойкость бетона, арматуры и железобетона в агрессивных средах. М.: НИИЖБ Госстроя СССР. 1988.
9. Юдович Г.Э., Звездов А.И., Джантимиров Х.А., Зубехин С.А. Минеральная арматура в наномодифицированной портландцементной матрице // *Бетон и железобетон*. 2016. № 3. С. 9–12.
10. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. М.: Стройиздат, 2004. 144 с.
11. Кустикова Ю.О., Римшин В.И., Шубин Л.И. Практические рекомендации и технико-экономические обоснования применения композитной арматуры в железобетонных конструкциях зданий и сооружений // *Жилищное строительство*. 2014. № 7. С. 14–19.

References

1. Alekseev S.N. Korroziya i zashchita armatury v betone [Corrosion and owprotection of reinforcement in concrete]. Moscow: Stroyizdat. 1968. 231 p.
2. Vasiliev A.I. Evaluation of corrosion wear of working reinforcement in beams of spans of road bridges. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 2000. No. 2, pp. 20–23. (In Russian).
3. Alekseev S.N., Ivanov F.M., Modra S., Shissl P. Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnykh sredakh [Durability of reinforced concrete in aggressive environments]. Moscow: Gosstroyizdat. 1990. 320 p.
4. Ivanov N.I. Sbornik zadach po soprotivleniyu materialov [Material resistance task book]. Moscow: Gostekhizdat. 1956. 352 p.
5. Zaitsev Y.V. Mekhanika razrusheniya dlya stroitelei [Mechanics of destruction for builders]. Moscow: Vysshaja shkola. 1991. 287 p.
6. Patent RF 2744905 *Sposob povysheniya nadezhnosti i dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruksii* [Method for improving reliability and durability of reinforced concrete structures]. Kurshpel V.H., Kurchpel A.V. Published 17.03.2021 (In Russian).
7. Davidyuk A.N., Spivak N.A. Application of high-strength composites for reinforcement of reinforced concrete structures. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 2016. No. 2, pp. 13–16.
8. Wildavsky Y.M., Aslanova L.G. Primenenie stekloplastikovoii armatury v betonakh spetsial'nogo naznacheniya. Korroziionnaya stoikost' betona, armatury i zhelezobetona v agressivnykh sredakh [Application of fiberglass reinforcement in special-purpose concrete. Corrosion resistance of concrete, reinforcement and reinforced concrete in aggressive environments]. Moscow: NIIZB, Gosstroy of the USSR. 1988.
9. Yudovich G.E., Zvezdov A.I., Dzhantimirov Kh.A., Zubekhin S.A. Mineral reinforcement in nanomodified Portland cement matrix. *Beton i zhelezobeton*. 2016. No. 3, pp. 9–12. [Concrete and reinforced concrete] (In Russian).
10. Shilin A.A., Pshenichnyi V.A., Kartuzov D.V. Usilenie zhelezobetonnykh konstruksii kompozitnymi materialami [Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials]. Moscow: Stroyizdat. 2004. 144 p.
11. Kustikova Y.O., Rimshin V.I., Shubin L.I. Practical recommendations and feasibility studies for the use of composite reinforcement in reinforced concrete structures of buildings and structures. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014. No. 7, pp. 14–19. (In Russian).

К.Б. ШАРАФУТДИНОВ¹, инженер (аспирант), К.А. САРАЙКИНА¹, канд. техн. наук;
Г.Г. КАШЕВАРОВА^{1,2}, д-р техн. наук, профессор, член-корр. РААСН,
В.Т. ЕРОФЕЕВ^{2,3}, д-р техн. наук, академик РААСН

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29)

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

³ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (430005, г. Саранск, ул. Большевикская, 68)

Изучение эффективности суперабсорбирующей полимерной добавки для уменьшения аутогенной усадки бетона без снижения его прочности

Проанализированы результаты экспериментальных исследований влияния разных типов добавки суперабсорбирующих полимеров (САП) на прочность различных видов бетона, осуществленных как отечественными, так и зарубежными авторами. Целью данного исследования являлось изучение эффективности применения нового вида добавки для активизации процессов самозалечивания трещин в бетонных конструкциях без потери затвердевшего бетона. В результате проведения натурных экспериментов выявлена оптимальная дозировка использованной добавки. Установлено, что прочность бетона остается неизменной, если дозировка добавки суперабсорбента (САП) равна 0,5% от массы цемента или менее. Представлены результаты исследования свойств мелкозернистых и тяжелых бетонов, модифицированных суперабсорбирующей полимерной добавкой. Показана возможность применения современных интеллектуальных технологий (искусственных нейронных сетей) для прогнозирования свойств бетонной смеси и готового бетона (расплав конуса, прочность при изгибе и при сжатии) при заданных значениях входных параметров (дозировки САП и В/Ц), влияющие на характеристики бетона. Это открывает перспективы использования нейросети для создания материалов с заранее заданными свойствами.

Ключевые слова: бетон мелкозернистый, бетон тяжелый, добавка суперабсорбента, эффект самозалечивания, прочностные свойства, нейросети.

Для цитирования: Шарафутдинов К.Б., Сарайкина К.А., Кашеярова Г.Г., Ерофеев В.Т. Изучение эффективности суперабсорбирующей полимерной добавки для уменьшения аутогенной усадки бетона без снижения его прочности // *Строительные материалы*. 2021. № 12. С. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-61-68>

K.B. SHARAFUTDINOV¹, Engineer, K.A. SARAİKINA¹, Candidate of Sciences (Engineering); G.G. KASHEVAROVA^{1,2}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Corresponding member of RAACS; V.T. EROFEEV^{2,3}, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS

¹ Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Prospect, Perm, 614990, Russian Federation)

² Research Institute of Building Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

³ National Research N.P. Ogarev Mordovia State University (68, Bolshevistskaya Street, Saransk, 30005, Russian Federation)

Study of the Superabsorbent Polymer Additive Effectiveness to Reduce the Autogenous Shrinkage of Concrete without Reducing its Strength

The results of experimental studies of the effect of different types of additives of superabsorbent polymers (SAP) on the strength of various types of concrete carried out by both domestic and foreign authors are analyzed. The purpose of research was to study the effectiveness of using a new type of additive to activate the processes of self-healing of cracks in concrete structures without losing hardened concrete. As a result of field experiments, the optimal dosage of the used additive was revealed. It is shown that the strength of concrete remains unchanged if the dosage of the superabsorbent additive (SAP) is equal to 0.5% of the cement weight or less. The results of a study of the properties of fine-grained and heavy concrete modified with a superabsorbent polymer additive are presented. The possibility of using modern intelligent technologies (artificial neural networks) to predict the properties of concrete mixture and finished concrete (cone spreading, bending and compressive strength) at given values of input parameters (dosages of SAP and I/C), on the characteristics of concrete is shown. This opens up the prospects of using a neural network to create materials with predefined properties.

Keywords: fine-grained concrete, heavy concrete, superabsorbent additive, self-healing effect, strength properties, neural networks.

For citation: Sharafutdinov K.B., Saraikina K.A., Kashevarova G.G. Erofeev V.T. Study of the superabsorbent polymer additive effectiveness to reduce the autogenous shrinkage of concrete without reducing its strength. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 12, pp. 61–68. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-61-68>

Проблема производства высококачественных бетонов успешно решается в результате оптимизации их состава, активации компонентов бетонных смесей, модифицирования структуры материалов комплексными добавками различного функционального назначения. Вместе с тем довольно часто в ходе эксплуатации бетонные изделия и железобетонные конструкции подвергаются растрескиванию, что обуславливает ухудшение их качества и сокращение

ожидаемого срока эксплуатации. Трещины могут возникать как от силовых нагрузок (усадки и перегрузки бетонной конструкции), ошибок конструирования и т. д., так и под воздействием неблагоприятных условий окружающей среды (циклически действующей температуры, агрессивных сред).

С целью продления службы конструкций очень важно свести к минимуму распространение в бетоне трещин. Следовательно, есть насущный экономиче-

ский стимул для разработки бетона, способного самостоятельно восстанавливаться.

Известно, что живые организмы обладают естественной способностью за определенный промежуток времени самостоятельно залечивать небольшие повреждения без внешнего воздействия. Такая же картина наблюдается в старых строительных конструкциях — трещины небольших размеров самоустраняются за счет повторной кристаллизации кальцита. Однако железобетонные конструкции могут получить и значительные повреждения в виде трещин больших размеров, которые не способны самозалечиваться без активизации процессов, что обуславливает ухудшение их качества и сокращение ожидаемого срока эксплуатации. Бетонная конструкция может существенно ослабнуть после возникновения трещин шириной раскрытия более 0,2 мм, в которые проникают вредные вещества, вызывающие коррозию арматуры и впоследствии разрушение бетонной конструкции.

Разработке технологии получения бетонов, модифицированных различными добавками, и повышения прочности и долговечности самовосстанавливающихся железобетонных конструкций посвящены многочисленные работы зарубежных авторов [1–13] и др.

Над улучшением свойств цементных композитов с помощью добавок и технологии получения самовосстанавливающихся бетонов работали и российские ученые — В.Т. Ерофеев, В.Ф. Смирнов, В.Т. Фомичев [14–18] и др.

Настоящая работа посвящена анализу результатов исследования бетонов с добавкой суперабсорбирующих полимеров, способных поглощать большое количество жидкости, удерживать ее в течение длительного времени и постепенно высвобождать обратно. Это качество САП может быть использовано для повышения прочности бетона за счет эффекта внутреннего отверждения. Частицы САП, поглотившие воду, будут постепенно высвобождать ее, что обеспечит более полную гидратацию цемента во время твердения бетонов [19]. Внутреннее отверждение может снизить риск его растрескивания на ранних стадиях твердения и повысить прочность [20–22]. Этот эффект может быть полезен в современном строительстве, где используются высокопрочные бетоны с низким В/Ц.

Вместе с тем добавление САП увеличивает пористость затвердевшего бетона, что снижает его плотность и может негативно сказаться на прочности. Частица САП способна поглощать объем жидкости, в 400 раз превышающий ее массу. В результате каждая частица полимера существенно увеличивается в объеме, что негативно влияет на бетон. Пустоты появляются в тех местах, где находились частицы САП. Эти пустоты можно идентифицировать как макропоры, которые снижают прочность бетона. Исследования S.-H. Kang [23] показывают, что объем пустот зависит от поглощающей способности используемого САП. Даже если его дозировка в бетоне невелика, объем пустот, образующихся в затвердевшем бетоне,

может быть большим только из-за высокой поглощающей способности используемого САП.

Влияние САП на прочность затвердевшего бетона зависит как от типа добавки, так и от характеристик компонентов бетонной смеси. Размер частиц САП, способ его производства и дозировка также влияют на характеристики смеси и затвердевшего бетона. В работе [24] провели ряд экспериментов, которые показали, как различные дозировки САП, В/Ц и сроки твердения влияют на прочность затвердевшего бетона. По результатам сделаны выводы, что при увеличении дозировки САП прочность затвердевшего бетона снижается. Главным фактором, определяющим его прочность, является правильное соотношение воды и цемента в смеси.

Добавка суперабсорбента также влияет на скорость набора прочности бетона. Авторы работы [25] изучали свойства твердеющего бетона с данной добавкой. Результаты их экспериментов показали, что прочность образцов бетона с САП на 7-е сут твердения значительно ниже прочности образцов бетона без САП, если соотношение В/Ц при изготовлении смеси было постоянным. На 14-е сут твердения образцы с этой добавкой и без нее были одинаковы по прочности при сжатии. На 28-е сут бетон с дозировкой САП, равной 0,33% от массы цемента, имел на 5% выше прочность при сжатии. Исследования [26] также показали, что использование САП в дозировке, равной 0,3%, не вызывает существенного снижения прочности на 28-е сут твердения.

Исследования Д. Попова, В. Лесовика, В. Мещерина [27, 28] свидетельствуют, что прочность бетона при сжатии увеличивается до 7% при дозировке САП 0,3% от массы цемента. Сопоставимые результаты получены в работах [29, 30]. Авторами работы [31] получено незначительное увеличение прочности при сжатии только при добавлении 0,3% САП совместно с противоусадочной добавкой. Однако другие исследователи показывают, что дозировки САП 0,3% не влияют на повышение прочности при сжатии. Так, в работе [21] проведен эксперимент с САП трех типов, и все они обуславливали снижение этого показателя на 5–15%. Такие же результаты были получены авторами [22]. Снижение прочности бетона при сжатии при дозировке САП, равной 0,3% от массы цемента, составило 10–12% после 7 и 28 сут твердения.

Можно сделать вывод, что оптимальная дозировка САП различна для каждого типа добавки. Поэтому экспериментальные результаты часто несопоставимы из-за различий в типе САП, составе бетонной смеси и его водоцементном соотношении.

Для изучения эффективности использования того или иного типа САП необходимо проведение экспериментальных исследований. Прежде всего важно определить влияние добавки на прочность бетона. Полученные результаты помогут определить дальнейшие перспективы ее применения в бетонных конструкциях.

Цель представленного экспериментального исследования состояла в изучении влияния добавки

САП на прочность при сжатии затвердевшего бетона и выявлении перспектив использования нейросетевых технологий для определения возможности заливки трещин и определения аутогенной усадки бетона с включением САП.

Материалы и методы

В качестве вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н производства ООО «Горнозаводскцемент».

В качестве добавки был выбран суперабсорбент-полимер производства корейской компании «GV HoldingsCo», абсорбционная способность которого составляет 400 г воды на 1 г, средний размер частиц 300 мкм. Данная добавка ранее не изучалась, поэтому исследования были начаты с проведения экспериментов с различными дозировками САП и В/Ц с целью установления эффективности выбранного вида.

Суперабсорбент-полимер вносили в сухую смесь заполнителя и цемента и перемешивали вручную перед добавлением воды.

Были изучены бетоны как на мелком заполнителе, так и на смеси мелкого и крупного. В первом случае использован мелкозернистый речной песок фракции 0–2,5 мм. Во втором составе использован этот же песок и доломитовый щебень фракции 5–10 мм.

Для проведения эксперимента были заформованы образцы согласно действующим нормативным документам. Первая серия образцов была изготовле-

на в виде балочек размером 4×4×16 см, вторая серия – образцы-кубы с размером ребра 10 см.

Из мелкозернистого бетона были изготовлены две серии образцов с четырьмя различными составами для каждой серии. Первые четыре смеси изготовлены в соответствии с нормальной консистенцией бетонного раствора, когда расплыв конуса у каждой смеси составлял 106–115 мм. Для остальных четырех составов соотношение В/Ц=0,5 было принято постоянным для получения расплыва конуса, равного 106–115 мм при дозировке САП 1%. Расплыв конуса раствора определяли после смешивания каждого состава. Составы экспериментальных растворов для образцов из мелкозернистого бетона приведены в табл. 1.

Образцы из тяжелого бетона (табл. 2) были сформированы с постоянным соотношением В/Ц, равным 0,5%. Осадку конуса определяли после перемешивания составов.

Бетонные образцы набирали прочность при нормальных температурно-влажностных условиях в течение 28 сут перед испытаниями на сжатие. Каждая из серий образцов испытывалась на 28-е сут твердения.

Результаты и обсуждение

Увеличение дозировки САП привело к повышению водопотребности смеси. При формовании опытных образцов № 1–4 из мелкозернистого бетона определялась зависимость В/Ц от дозировки САП для нормальной консистенции раствора. При использовании САП от 0 до 1% полученная зависимость В/Ц от

Таблица 1
Table 1

Экспериментальные составы для образцов из мелкозернистого бетона
Experimental compositions for samples from fine-grained concrete

Состав	САП, % от массы цемента	В/Ц	Количество материалов для 1 м ³ раствора, кг				
			Цемент	Песок	Вода	САП	Расплыв конуса раствора
1–1	0	0,42	650	1950	273	0	
1–2	0,25	0,44	650	1950	286	1,625	
1–3	0,5	0,46	650	1950	299	3,25	
1–4	1	0,5	650	1950	325	6,5	
2–1	0	0,5	650	1950	273	0	
2–2	0,25	0,5	650	1950	286	1,625	
2–3	0,5	0,5	650	1950	299	3,25	
2–4	1	0,5	650	1950	325	6,5	

Table 2
Таблица 2

Экспериментальные составы для образцов из тяжелого бетона
Experimental compositions for heavy concrete specimens

Состав	САП, % от массы цемента	В/Ц	Количество материалов для 1 м ³ раствора, кг				
			Цемент	Песок	Щебень	Вода	САП
1	0	0,55	365	850	1200	200	0
2	0,5	0,55	365	850	1200	200	1,825

его дозировки оказалась линейной (рис. 1). Эта зависимость применима лишь для сырья, используемого в данном эксперименте, и только в том случае, если дозировка САП составляет от 0 до 1% от массы цемента.

Увеличение дозировки САП приводило к уменьшению распыла конуса при постоянном В/Ц, равном 0,5. Эта зависимость не является линейной

(рис. 2), ограничена допустимыми значениями распыла конуса и также применима только для сырья, используемого в данном эксперименте, и лишь в том случае, если дозировка САП составляет от 0 до 1% от массы цемента.

На рис. 3–4 показана зависимость прочности при изгибе и сжатии образцов бетона от дозировки ис-

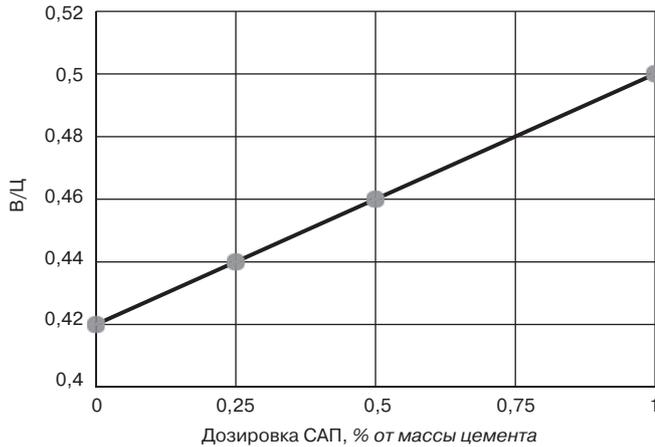


Рис. 1. Значения В/Ц раствора от дозировки САП для нормальной консистенции

Fig. 1. Values of W/C solution from SAP dosage for normal consistency

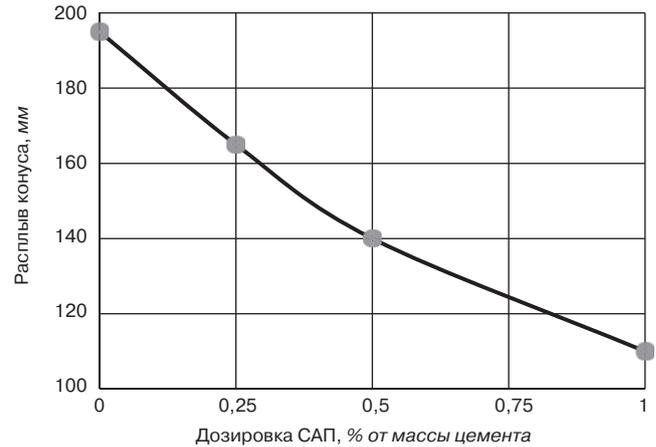


Рис. 2. Зависимость распыла конуса от дозировки САП при В/Ц=0,5

Fig. 2. Dependence of the cone spreading on the SAP dosage at W/C=0,5

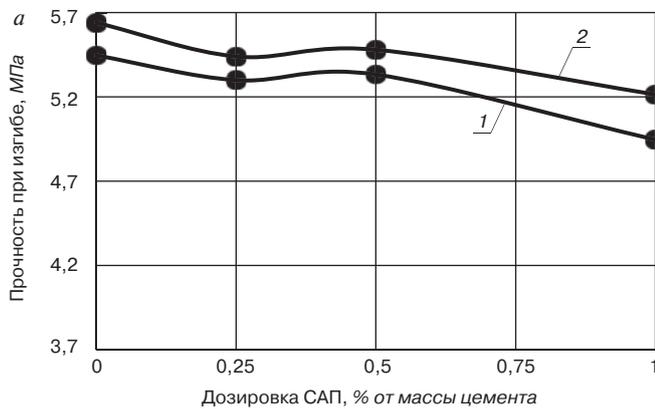


Рис. 3. Графики зависимости прочности образцов при изгибе (а) и сжатии (б) от дозировки САП при постоянном распыле конуса, равном 106–115 мм: 1 – средняя; 2 – по ГОСТ 310.4–81

Fig. 3. Graphs of the dependence of the strength of samples in bending (a) and compression (b) on the dosage of SAP at a constant cone spreading equal to 106–115 mm: 1 – average; 2 – According to GOST 310.4–81

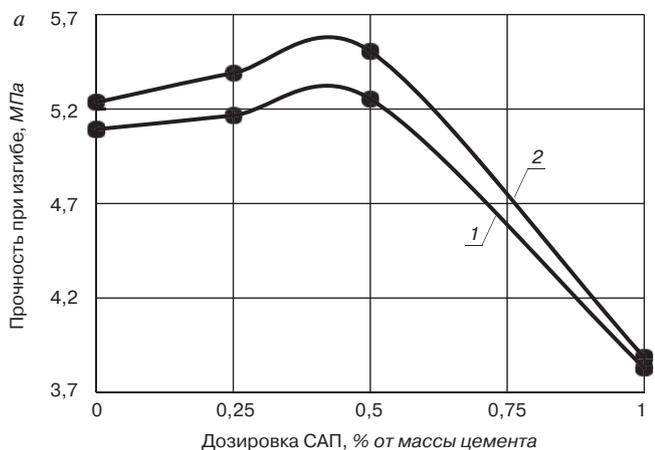
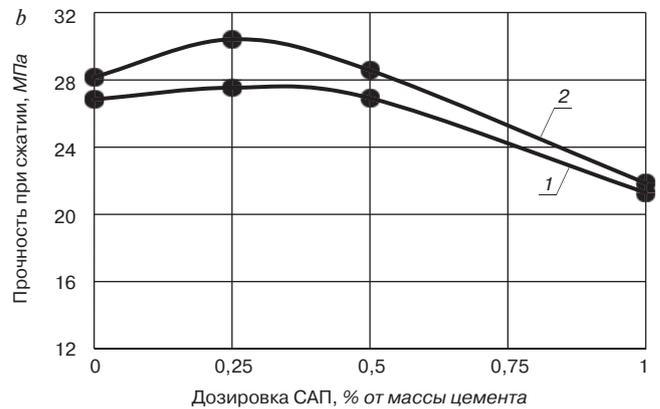
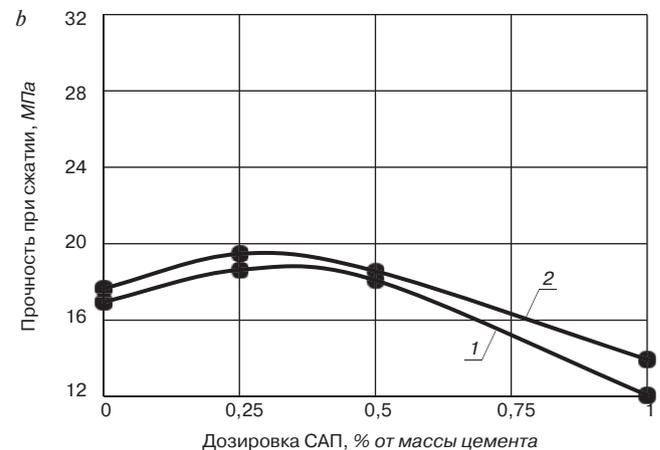


Рис. 4. График зависимости прочности образцов при изгибе (а) и сжатии (б) от дозировки САП при постоянном В/Ц=0,5: 1 – средний; 2 – стандарт



следуемого типа САП. Приведены значения прочности, определенные в соответствии со стандартами, и ее средние значения.

Приведенные графики можно представить в виде поверхности, показанной на рис. 5, формируемой тремя величинами: В/Ц, процент добавки САП и прочность бетона. Это позволяет увидеть более наглядный результат исследования.

Из приведенных графиков видно, что при дозировках САП до 0,5% прочность при изгибе и сжатии мелкозернистого бетона не меняется. Однако при увеличении концентрации до 1% она снижается на 20–25%. Можно сделать вывод, что для дальнейших исследований этого вида САП следует выбирать его дозировку не более 0,5% от массы цемента. Прочность бетона при сжатии незначительно повышается при дозировках добавки, равных 0,25% от массы цемента.

Результаты испытаний растворяемых смесей можно сравнить с результатами, полученными при испытании образцов из тяжелого бетона. Авторами исследовалась только дозировка добавки, равная 0,5% от массы цемента, а в качестве параметра свойств – прочность бетона при сжатии. Эксперименты показали, что включение САП в количестве 0,5% от массы цемента повышает прочность при сжатии тяжелого бетона на 9% при постоянном В/Ц, равном 0,5. Прочность мелкозернистого бетона при тех же условиях увеличилась на 7%.

По мере накопления экспериментальных данных актуальными становятся их обобщение и статистическая обработка. Решение этой задачи позволяет перейти к созданию методов прогнозирования заданного набора свойств новых бетонов.

В настоящее время наблюдается рост интереса к теории и практике использования искусственных нейронных сетей. Благодаря способности аппроксими-

мировать нелинейные зависимости произвольного вида они наилучшим образом подходят для моделирования физико-механических свойств материалов, зависящих от таких параметров, как состав раствора и смесей, температура, давление и др. [32, 33].

Нейросеть, обученная на собранной в результате исследования базе информации, сможет прогнозировать свойства получаемого материала. Это позволит оптимально спланировать дальнейшие исследования и уменьшить количество необходимых экспериментов.

Данное исследование проводилось на восьми типах составов бетона, в которых различались лишь дозировка САП и В/Ц. Все остальные параметры были одинаковыми, поэтому в качестве входных значений можно принять названные переменные. В результате исследования для каждой бетонной смеси были получены данные: расплыв конуса раствора, прочность при изгибе и сжатии. Эти значения являются выходными данными. Полученные результаты приведены в табл. 3.

Для создания примитивного варианта нейронной сети был использован язык программирования Python и его математическая библиотека *numpy*.

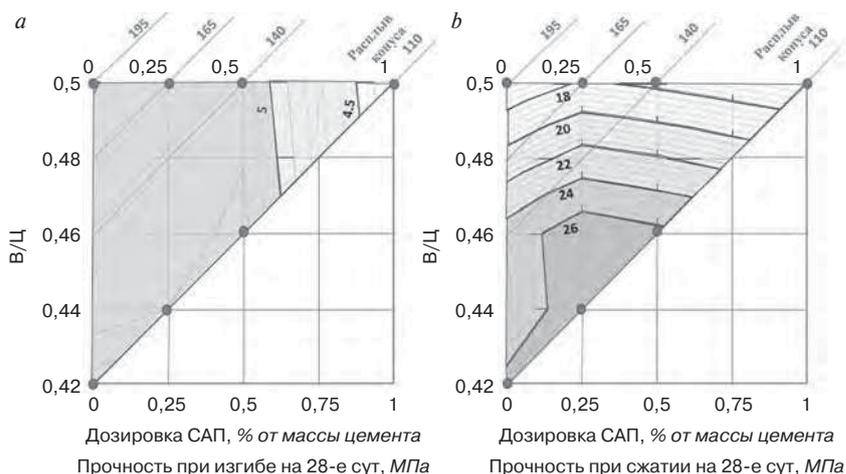


Рис. 5. Величины прочности образцов при изгибе (а) и сжатии (b) в зависимости от соотношения В/Ц и дозировки САП
Fig. 5. Values of bending (a) and compressive (b) strengths of specimens depending on the W/C ratio and SAP dosage

Таблица 3
Table 3

База нейронной сети
Neural network base

Состав бетона №	Входные параметры		Выходные параметры – результат		
	САП, % от массы цемента	В/Ц	Расплыв конуса, мм	Прочность при изгибе, МПа	Прочность при сжатии, МПа
1	0	0,42	120	5,44	26,84
2	0,25	0,44	120	5,3	27,54
3	0,5	0,46	120	5,33	26,92
4	1	0,5	120	4,96	21,29
5	0	0,5	195	5,09	16,96
6	0,25	0,5	165	5,17	18,64
7	0,5	0,5	140	5,25	18,57
8	1	0,5	120	3,83	12,07

Таблица 4
Table 4

Матрица обучения нейронной сети
Neural network learning matrix

Состав №	Входные параметры		Выходные параметры – результат		
	X1	X2	Y1	Y2	Y3
1	0	0,84	0,615	1	0,974
2	0,25	0,88	0,615	0,974	1
3	0,5	0,92	0,615	0,979	0,977
4	1	1	0,615	0,911	0,773
5	0	1	1	0,935	0,616
6	0,25	1	0,846	0,95	0,676
7	0,5	1	0,718	0,965	0,674
8	1	1	0,615	0,704	0,438

Таблица 5
Table 5

Входные и выходные параметры нейронной сети
Input and output parameters of the neural network

Состав №	Входные параметры		Выходные параметры – результат		
	X1	X2	Y1	Y2	Y3
H-1	0,75	1	0,656	0,917	0,713
H-2	0,3	1	0,751	0,983	0,823
H-3	1	1,2	0,662	0,924	0,722

Общий принцип заключался в том, что в качестве обучающей выборки была использована таблица с полученными результатами по составам № 1–8. Значения табл. 3 были нормализованы в диапазоне от 0 до 1 методами интерполяции относительно максимальных значений выходных данных. Обучающая выборка представлена в табл. 4.

Для определения перспективы применения нейросети были выбраны новые составы, для которых известны входные значения: дозировка САП и В/Ц, но неизвестны выходные – распыл конуса, прочность при изгибе и сжатии. В обученную нейросеть были поданы новые нормализованные входные значения (табл. 5). Здесь же представлен результат работы нейронной сети.

После перевода полученных величин из нормализованных в расчетные получены результаты работы нейросети, представленные в табл. 6.

Полученные значения позволяют спрогнозировать свойства бетонной смеси и затвердевшего бетона при заданных значениях.

В результате проведенных экспериментов можно предположить, что исследуемый тип САП не снижает прочности бетона при дозировках до 0,5% от массы цемента, поэтому может быть использован для улучшения других характеристик бетона.

Включение в состав бетонной смеси САП обуславливает увеличение В/Ц, поэтому для более результативного использования добавки следует учитывать эффект от ее использования совместно с пластифицирующими и противосадочными добавками [34, 35]. Для планирования следующих экспериментов с исследуемой добавкой САП необходимо рассмотреть варианты и методы дальнейших исследований. Способность частиц САП поглощать большое количество воды и увеличиваться в объеме позволяет использовать его для создания самозалечивающегося бетона и снижения его аутогенной усадки, что может увеличить долговечность бетонной конструкции.

Интерес к теории и практике использования искусственных нейронных сетей кроется в их способности аппроксимировать нелинейные зависимости произвольного вида при помощи неформализуемых алгоритмов, которые сами же нейронные сети и находят. Недостатком представленной системы является отсутствие обучающей выборки большого объема, поэтому при работе нейросети возможны погрешности.

Выводы

1. Приведены результаты исследований свойств мелкозернистых и тяжелых бетонов, модифицированных суперабсорбирующей полимерной добавкой.
2. Увеличение дозировки САП повышает водопотребность бетонных смесей. Выявлено, что при постоянном В/Ц происходит уменьшение распыла конуса.
3. Зависимость изменения В/Ц от дозировки САП для достижения распыла конуса 106–115 мм является линейной.
4. Дозировка САП 0,5% от массы цемента увеличивает прочность при сжатии мелкозернистого бетона до 7% при постоянном В/Ц, равном 0,5, при этом прочность при изгибе не снижается.
5. Дозировка САП 0,5% от массы цемента увеличивает прочность при сжатии тяжелого бетона до 9% при постоянном соотношении В/Ц, равном 0,55, но значительно снижает его подвижность.
6. Увеличение дозировки САП до 1% от массы цемента снижает прочность затвердевшего бетона на

Таблица 6
Table 6

Результаты работы нейросети
Results of the neural network operation

Состав №	Входные параметры		Выходные параметры – результат		
	САП, % от массы цемента	В/Ц	Распыл конуса, мм	Прочность при изгибе, МПа	Прочность при сжатии, МПа
H-1	0,75	0,5	128	4,988	19,636
H-2	0,3	0,5	146	5,347	22,665
H-3	1	0,6	129	5,026	19,884

20–25%, поэтому для дальнейших исследований рекомендована дозировка добавки не более 0,5%.

7. Исследованный тип САП может быть эффективным для снижения аутогенной усадки бетона без снижения его прочности, а также использован для создания самозалечивающегося бетона.

8. Полученные результаты показывают эффективность применения данного вида САП при изготовлении бетона и конструкций на его основе.

9. Показана перспективность использования искусственных нейронных сетей для прогнозирования свойств бетона.

10. В перспективе планируется создать более обширную базу данных, которая будет использована в качестве обучающей выборки в исследовании зависимостей «структура–свойства».

Список литературы / References

- Achal V. Microbial remediation of defects in building materials and structures: PhD thesis. India:Thapar University, Patiala. 2010. 263 p.
- Castanier S., Métyayer-Levrel G.L., Perthuisot J.P. Bacterial roles in the precipitation of carbonate minerals. In: Riding R.E., Awramik S.M. (eds) *Microbial Sediments*. 2000, pp. 32–39. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04036-2_5
- Chun Xiang Qian, Qingfeng Pan, Ruixing Wang. Cementation of sand grains based on carbonate precipitation induced by microorganism. *Science China Technological Sciences*. 2010. Vol. 53 (8), pp. 2198–2206. DOI: 10.1007/s11431-009-3189-z
- De Muynckab W., Coxa K., De Beliea N., Verstraeteb W. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22. Iss. 5, pp. 875–885. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.011>
- Jonkers H.M., Schlangen E. Development of a bacteria-based self-healing concrete. *Tailor Made Concrete Structures – New Solution for Society*. 2008, pp. 425–430. DOI: 10.1201/9781439828410.ch72
- De Muynck W., De Belie N., Verstraeteb W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. *Ecological Engineering*. 2010. Vol. 36. Iss. 2, pp. 118–136. <https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2009.02.006>
- Sanchez-Silva M. Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2010. Vol. 64 (8), pp. 748–754. DOI: 10.1016/j.ibiod.2010.09.001
- Park J., Park M., Chun W.-Y., Ghim S.-Y. Calcite-forming bacteria for compressive strength improvement in mortar. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2010. Vol. 20 (4), pp. 782–788.
- Wang J.Y., Van Tittelboom K., De Belie N., Verstraete W. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction Building Materials*. 2012. Vol. 26. No. 1, pp. 532–540. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.054>
- Akimov L., Ilenko N., Mizharev R., Cherkashin A., Vatin N., Chumadova L. Composite concrete modifier CM 02-10 and its impact on the strength characteristics of concrete. *MATEC Web of Conferences* 53, 01022 (2016). <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165301022>
- Frolov A., Cherkashin A., Akimov L., Vatin N., Koltsova T., Nasibulin A., Tolochko O., Chumadova L. An impact of carbon nanostructured additives on the kinetics of cement hydration. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 725–726, pp. 425–430. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.425
- Akimov L., Ilenko N., Mizharev R., Cherkashin A. Influence of plasticizing siliceous additives on the strength characteristics of concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 725–726, pp. 461–468. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.461
- Lee H.X.D., Wong H.S., Buenfeld N.R. Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers. *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 79, pp. 194–208. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.008>
- Бруяко М.Г., Григорьева А.И., Голотенко Д.С., Подсевалова А.А. Биомодифицирование строительных материалов бактериями с уреазной активностью // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 2 (88). С. 5–15.
- Bruyako M.G., Grigorieva A.I., Golotenko D.S., Podsevalova A.A. Biomodification of building materials by bacteria with urease activity. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2020. No. 2 (88), pp. 5–15. (In Russian).
- Ерофеев В.Т., Фомичев В.Т. Химические аспекты процесса устранения трещин бетона с помощью бактерий // *Транспортные сооружения: Интернет-журнал*. 2018. Т. 5. № 3. С. 12. <https://t-s.today/PDF/13SATS318.pdf>
- Erofeev V.T., Fomichev V.T. Chemical aspects of the process of eliminating concrete cracks with the help of bacteria. *Transportnyye sooruzheniya: Online Journal*. 2018. Vol. 5. No. 3, p. 12. <https://t-s.today/PDF/13SATS318.pdf> (In Russian).
- Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф. Бактерии для получения самовосстанавливающихся бетонов. *Транспортные сооружения: Интернет-журнал*. 2018. Т. 5. № 4. С. 6. <https://t-s.today/PDF/07SATS418.pdf>
- Erofeev V.T., Smirnov V.F. Bacteria for obtaining self-healing concretes. *Transportnyye sooruzheniya: Online Journal*. 2018. Vol. 5. No. 4, p. 6. <https://t-s.today/PDF/07SATS418.pdf> (In Russian).
- Bobrishev A.A., Shafigullin L.N., Erofeev V.T., Treshchev A.A., Study of effects of redispersable latex powders on hardening kinetics of cement-sand composites. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016. Vol. 7 (4), pp. 795–802.
- Erofeev V., Bobryshev A., Lakhno A., Shafigullin L., Khalilov I., Sibgatullin K., Igtisamov R. Theoretical evaluation of rheological state of sand cement composite systems with polyoxyethylene additive using topological dynamics concept. *Solid State Phenomena*.

2016. Vol. 871, pp. 96–103. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.871.96.
19. Pattharaphon C., Hiroshi Y. Paponpat P. Effect of fly ash and superabsorbent polymer on concrete self-healing ability. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 233. 116975. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116975>
 20. Byoungsun P., Young C.C. Self-healing capability of cementitious materials with crystalline admixtures and super absorbent polymers (SAPs). *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 189, pp. 1054–1066. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.061>
 21. Silva E., Alejandro M.R.M., Lopes A.N.M., Dias R.T.F. Effect of sap on the autogenous shrinkage and compressive strength of high-strength fine-grained concrete. 2020. *Conference: International Conference Application of Superabsorbent Polymers and other New Admixtures in Concrete Construction*.
 22. Meyst L., Kheir J., Roberto J.T.F., Tittelboom K.V. The use of superabsorbent polymers in high performance concrete to mitigate autogenous shrinkage in a large-scale demonstrator. *Sustainability*. 2020. 12 (Special Issue Crack Prediction and Preventive Repair Methods for the Increasing Sustainability and Safety Requirements of Structures). DOI: 10.3390/su12114741
 23. Kang S.H., Hong S.G., Moon J. The effect of superabsorbent polymer on various scale of pore structure in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 172, pp. 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.193>
 24. Olawuyi B.J., Babafemi A.J., Boshoff W.P. Early-age and long-term strength development of high-performance concrete with SAP. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 267. 121798 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121798>
 25. Li L., Dabarera A.G.P., Dao V. Time-zero and deformational characteristics of high performance concrete with and without superabsorbent polymers at early ages. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 264. 120262 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120262>
 26. Tan Y., Lu X., He R., Chen H. Influence of superabsorbent polymers (SAPs) type and particle size on the performance of surrounding cement-based materials. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 270. 121442. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121442
 27. Попов Д.Ю., Лесовик В.С., Мещерин В.С. Влияние суперабсорбирующих полимеров на пластическую усадку цементного камня // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 11. С. 6–12.
 27. Popov D.Y., Lesovik V.S., Mechtcherine V.S. Influence of superabsorbent polymers on plastic shrinkage of cement stone. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2016. No. 11, pp. 6–12. (In Russian).
 28. Мещерин В. Высокопрочные и сверхпрочные бетоны: технологии производства и сферы применения // *СтройПРОФИль*. 2008. № 8 (70). С. 32–35.
 28. Meshcherin V. High-strength and super-strong concretes: production technologies and applications. *StroyPROFIL*. 2008. No. 8 (70), pp. 32–35. (In Russian).
 29. Rodriguez G.P., Goncalves A. Effects of fine LWA and SAP as internal water curing agents. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2014. Vol. 8 (3). DOI: 10.1007/s40069-014-0076-1
 30. Tan Y., Chen H., Wang Z., Xue C. 2019 Performances of cement mortar incorporating superabsorbent polymer (SAP) using different dosing methods. *Materials*. 2019. Vol. 12 (10). 1619. <https://doi.org/10.3390/ma12101619>
 31. Liu J., Farzadnia N., Shi C., Ma X. 2019 Shrinkage and strength development of UHSC incorporating a hybrid system of SAP and SRA. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 97, pp. 175–189. (In Russian). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.029>
 32. Горбань А.Н. Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей // *Сибирский журнал вычислительной математики*. 1998. Т. 1. № 1. С. 11–24.
 32. Gorban A.N. Generalized approximation theorem and computational capabilities of neural networks. *Sibirskiy zhurnal vychislitel'noy matematiki*. 1998. Vol. 1. No. 1, pp. 11–24. (In Russian).
 33. Гальберштам Н.М., Баскин И.И., Палюлин В.А., Зефирова Н.С. Нейронные сети как метод поиска зависимостей структура – свойство органических соединений // *Успехи химии*. 2003. Т. 72. № 7. С. 706–727.
 33. Galberstam N.M., Baskin I.I., Palyulin V.A., Zefirov N.S., Neural networks as a method for searching for structure-property relationships of organic compounds. *Uspekhi khimii*. 2003. Vol. 72. No. 7, pp. 706–727. (In Russian).
 34. Зайченко Н.М., Лахтарина С.В. Конструкционный легкий бетон с внутренним уходом // *Строитель Донбасса*. 2018. № 1 (2). С. 7–16.
 34. Zaichenko N.M., Lakhtarina S.V. Structural lightweight concrete with internal care. *Stroitel' Donbassa*. 2018. No. 1 (2), pp. 7–16. (In Russian).
 35. Барабаншиков Ю.Г., Архарова А.А., Терновский М.В. О влиянии суперпластификатора на эффективность противоусадочной добавки // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 7. С. 23–30. DOI: 10.5862/MCE.51.3
 35. Varabanshchikov Yu.G., Arkharova A.A., Ternovskii M.V. On the influence on the efficiency of anti-shrinkage additives superplasticizer. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. No. 7, pp. 23–30. DOI: 10.5862/MCE.51.3 (In Russian).

УДК 691.5

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-69-72>

С.А. КНЯЗЕВА¹, инженер (аспирант) (svetiksm_knyazeva@mail.ru),
 Г.И. ЯКОВЛЕВ¹, д-р. техн. наук (gyakov@istu.ru);
 А.И. ХАРЧЕНКО², канд. техн. наук (iharcenko@mail.ru)

¹ Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова (426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7)

² Научно-исследовательский центр подземных сооружений (ООО «НИЦ ПС») (119311, г. Москва, ул. Строителей, 6, корп. 6)

Геополимерная композиция на основе керамзитовой пыли для геотехнического строительства

Производство портландцемента связано со значительным потреблением природного минерального сырья, существенными энергозатратами и огромными выбросами в атмосферу углекислого газа. В этой связи поиск путей снижения затрат на его производство и уменьшение негативного влияния на окружающую среду является актуальной задачей. Одним из эффективных путей решения этой проблемы может быть частичная замена в геотехническом строительстве традиционных минеральных вяжущих композиционными вяжущими на основе геополимерных систем. Геополимеры – минеральные гидравлические вяжущие, получаемые щелочной активацией алюмосиликатного сырья природного и техногенного происхождения. В представленной работе рассмотрена возможность получения геополимерных вяжущих на основе керамзитовой пыли, которая является отходом керамзитовой промышленности, улавливаемой в системах пылеочистки обжиговых печей: пылеосадительных камерах, циклонах, фильтрах. В результате проведенных исследований установлено, что керамзитовая пыль обладает достаточной гидравлической активностью как при затворении водой, так и при применении различных щелочных активаторов. В связи с тем, что геополимерные системы и продукты их гидратации по своему химическому и минеральному составу являются однородными с природными грунтами, инъекционные смеси на основе геополимеров могут найти эффективное применение для упрочнения и уплотнения грунтов при решении различных геотехнических задач.

Ключевые слова: геополимер, керамзитовая пыль, хлорид кальция, гидравлическая активность, энергосбережение, экология, утилизация отходов.

Для цитирования: Князева С.А., Яковлев Г.И., Харченко А.И. Геополимерная композиция на основе керамзитовой пыли для геотехнического строительства // *Строительные материалы*. 2021. № 12. С. 69–72.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-69-72>

S.A. KNYAZEVA¹, Engineer (graduate student) (svetiksm_knyazeva@mail.ru), G.I. YAKOVLEV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (gyakov@istu.ru);
 I.Ya. HARCHENKO², Doctor of Sciences (Engineering) (iharcenko@mail.ru)

¹ Kalashnikov Izhevsk State University (7, Studencheskaya Street, Izhevsk, 426069, Russian Federation)

² Science Research Centre for Underground Construction (SRC UC) (build. 6, 6, Stroiteley Street, Moscow, 119311, Russian Federation)

Geopolymer Composition on the Basis of Expanded Clay Dust For Geotechnical Construction

Portland cement production is associated with high consumption of minerals, significant energy demand and huge emissions of carbon dioxide into the atmosphere. Therefore, it is important to search for the ways to reduce the cement cost, as well as the negative impact of its production on the environment. An effective way to solve this problem may be the partial replacement of traditional mineral binders in geotechnical construction with composite binders based on geopolymer systems. The term "geopolymers" unites all mineral hydraulic binders obtained by alkaline activation of aluminosilicate raw materials of natural and technogenic origin. In this paper, the possibility of producing a geopolymer based on expanded clay dust is assessed. Expanded clay dust is a waste of the expanded clay production industry, captured in the dust cleaning systems of kilns (dust collection chambers, cyclones, filters). In the course of this research, it was found out that expanded clay dust has sufficient hydraulic activity both when mixed with water and with various alkaline activators. Due to the fact that geopolymer systems and products of their hydration are similar in chemical and mineral composition to natural soils, injectable mixtures based on geopolymers can be effectively used for hardening and compacting soils and solving other geotechnical problems.

Keywords: geopolymer, expanded clay dust, calcium chloride, hydraulic activity, energy saving, ecology, waste disposal.

For citation: Knyazeva S.A., Yakovlev G.I., Kharchenko A.I. Geopolymer composition on the basis of expanded clay dust for geotechnical construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 12, pp. 69–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-69-72>

Освоение подземного пространства крупных городов осуществляется в крайне сложных инженерно-геологических условиях плотной городской застройки, характеризующихся наличием мощных водоносных горизонтов с водовмещающими породами, представленными песчаными грунтами различной крупности с включением пылеватых и глинистых компонентов. При этом наибольшую сложность представляет собой строительство и эксплуатация подземных сооружений в условиях водонасыщенных неустойчивых грунтов, обладающих плавунными свойствами. Особенностью этих грунтов являет-

ся практически мгновенный переход в подвижное состояние, т. е. тиксотропное разжижение, под влиянием незначительных динамических или вибрационных воздействий в отсутствие в них каких-либо структурных связей [1, 2]. Следствием этого является интенсивный вынос значительных масс грунта в объем строящихся подземных сооружений или котлованов, сопровождающийся значительными осадками дневной поверхности, сверхнормативными деформациями зданий и сооружений, находящихся в зоне влияния строительства. Ликвидация этих явлений влечет значительные финансовые затраты, а

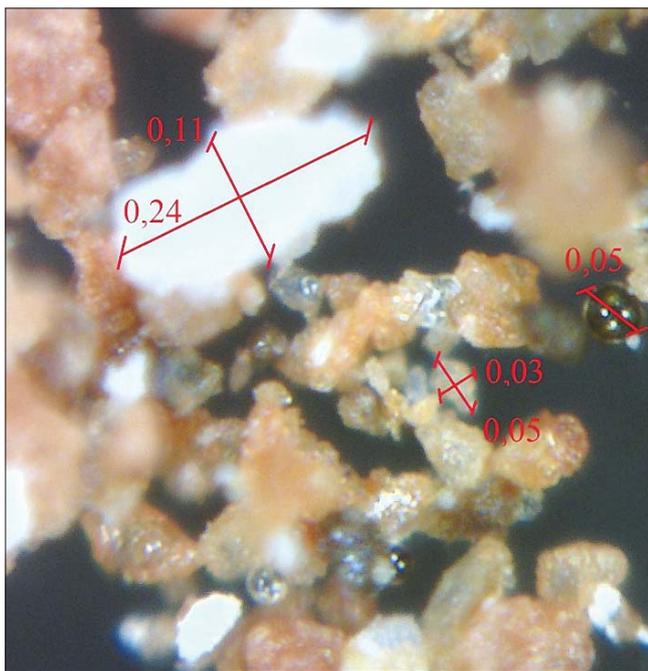


Рис. 1. Микроструктура керамзитовой пыли, ед. измерения, мм
Fig. 1. Microstructure of expanded clay dust, units of measurement, mm

также существенное увеличение сроков строительства [3].

Анализ результатов опыта практического применения традиционной технологии струйной цементации для закрепления и стабилизации плавунных грунтов показывает ее практическую непригодность в связи с отсутствием формирования устойчивого тела грунтоцементного массива и связанной структуры грунта. Применение манжетной технологии с использованием микроцементов, цементации грунта с применением цементно-бentonитовых силикатных смесей, инъекционных смесей на основе активированных бентонитов типа «Натлен», смолизации грунтов с применением карбамидных смол сопровождается гидроразрывами структуры грунтов и формированием локальных плотных зон и линз, что не

обеспечивает формирования устойчивого водонепроницаемого целика.

Возможным эффективным решением проблемы закрепления плавунных грунтов может стать струйная цементация или пропиточная инъекция в режиме управляемого компрессионного микрогидроразрыва с применением инъекционных смесей на основе геополлимерных вяжущих.

Геополлимеры – материалы, полученные путем щелочной активации алюмосиликатов: шлаков, зол, горных пород и др. Они являются химически стойкими, устойчивыми к воздействию различных факторов материалами, обладающими достаточно высокой прочностью и кинетикой затвердевания. [4–7].

В данной работе рассматривается инъекционный материал на основе смеси керамзитовой пыли и активатора твердения, в процессе реакции гидратации которых образуются гидросиликаты кальция, характеризующиеся большой удельной поверхностью. При этом структура плавунного грунта стабилизируется вследствие химического связывания структурной воды, а также физико-химического связывания воды, адсорбирующейся на поверхности гидросиликатов кальция. Кроме того, образующиеся продукты гидратации обеспечивают стабилизацию плавунного грунта вследствие физического эффекта «сшивания» структуры образовавшимися продуктами гидратации.

Материалы и методы исследования

В данной работе использовалась керамзитовая пыль с предприятия ООО «Ижевский завод кирпича и керамзита». Керамзитовая пыль является побочным продуктом, образующимся при обжиге керамзитового гравия во вращающихся печах при температуре до 1200°C [8, 9], которая улавливается в системах пылеочистки обжиговых печей.

Исследование дисперсности частиц керамзитовой пыли выполнено на лазерном анализаторе SALD-7500nano производства Shimadzu с разрешением от 7 до 800 мкм. Размер частиц варьируется в

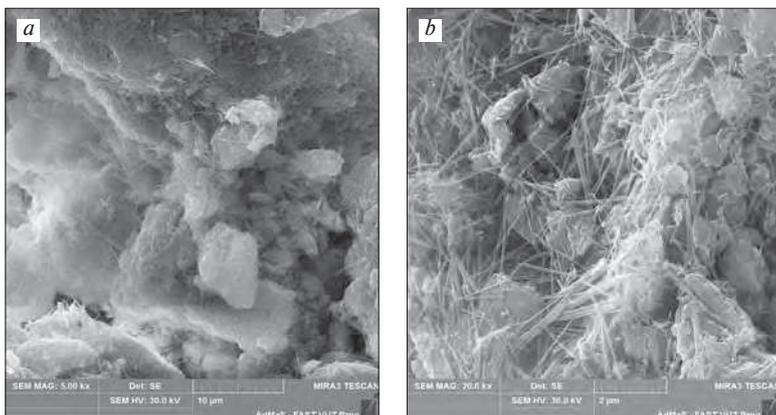


Рис. 2. Микроструктура образцов инъекционной смеси на основе керамзитовой пыли, затворенной водой, при увеличении $\times 5000$ – а; фрагмент микроструктуры образца при увеличении в $\times 20000$ – б

Fig. 2. Microstructure of samples of injectable mixture based on expanded clay dust, sealed with water at an increase of 5000 – a; fragment of the microstructure of the sample at an increase of 20000 – b

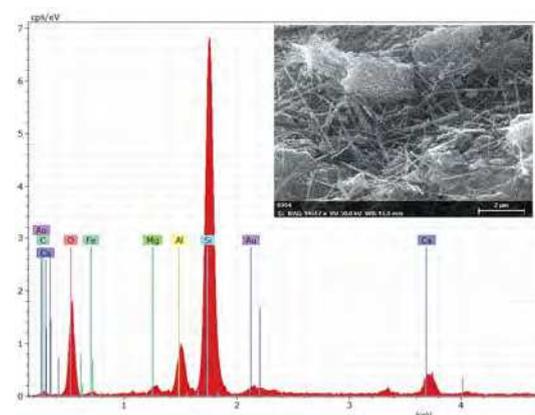


Рис. 3. Рентгеновский микроанализ состава на основе керамзитовой пыли, затворенной водой

Fig. 3. X-ray microanalysis of the composition, based on expanded clay dust, sealed with water

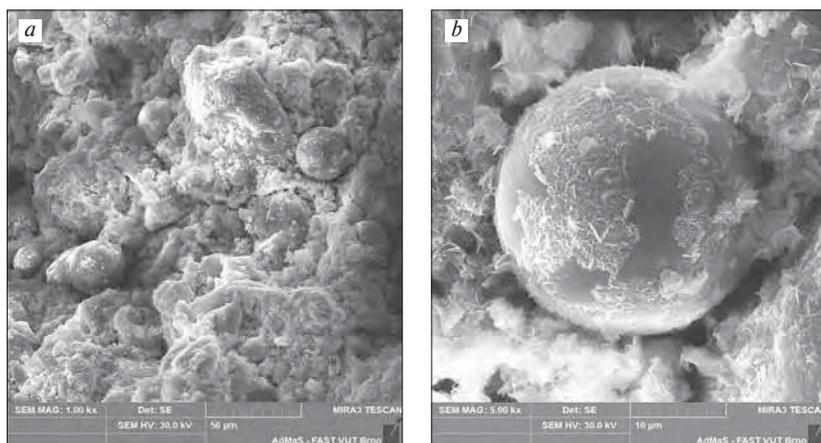


Рис. 4. Микроструктура образцов инъекционной смеси на основе керамзитовой пыли, затворенной раствором хлорида кальция при увеличении $\times 1000$ – *a*; фрагмент микроструктуры образца при увеличении $\times 5000$ – *b*

Fig. 4. Microstructure of samples of injectable mixture based on expanded clay dust, sealed with a solution of calcium chloride at an increase of 1000 – *a*; fragment of the microstructure of the sample at an increase of 5000 – *b*

пределах от 60 до 0,24 мм. На рис. 1 представлена микроструктура пыли.

Согласно [10] в составе керамзитовой пыли присутствуют кристаллический и аморфный оксид кремния SiO_2 , оксид кальция CaO , карбонат кальция CaCO_3 , низкоосновные силикаты кальция, полевые шпаты (ортотлаз) и монтмориллонит.

В работе рассматриваются две основные рецептуры инъекционных смесей: 1 – керамзитовая пыль, затворенная водой, как наиболее доступная базовая смесь; 2 – керамзитовая пыль, затворенная водным раствором хлористого кальция, с целью активации процесса твердения. Приготавливались равноподвижные инъекционные смеси, обеспечивающие равномерное распределение в структуре грунта. Изготовленные из них образцы с размерами $7 \times 7 \times 7$ см твердели во влажных условиях.

Анализ результатов экспериментальных исследований

В результате проведенных исследований установлено, что в составе керамзитовой пыли присутствуют аморфный кремнезем, оксид и гидроксид кальция. При затворении водой керамзитовой пыли оксид кальция CaO переходит в его гидроксид $\text{Ca}(\text{OH})_2$, который взаимодействует с аморфным кремнеземом, образуя гидрат геленита $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ и гидросиликат кальция типа $\text{CSH}(\text{B})$ [11–13].

Анализ микроструктуры и рентгеновский микроанализ образцов проводились в исследовательском центре AdMas Технического университета г. Брно (Чехия) на растровом электронном микроскопе Mira3 Tescan, результаты представлены на рис. 2, 3.

На снимке микроструктуры четко видны гидросиликаты кальция, представляющие собой бесцветные волокнистые кристаллы, и более толстые волокна кристаллов гидрата геленита.

Микроанализ волокнистых новообразований, приведенный на рис. 3, показал наличие Al, Si, Ca, O, входящих в состав гидрата геленита.

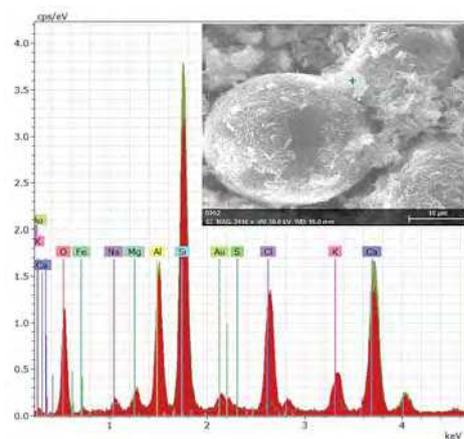


Рис. 5. Рентгеновский микроанализ состава, содержащего керамзитовую пыль и раствор хлорида кальция

Fig. 5. X-ray microanalysis of the composition, based on expanded clay dust, sealed with a solution of calcium chloride

Испытания на сжатие стандартных кубиков $7 \times 7 \times 7$ см проводились на прессе ПГМ-100МГ4 производства ООО «СКБ-Стройприбор» (Челябинск) на 14-е сут. Предел прочности при сжатии составил 1 МПа.

Известно, что в водных растворах хлористого кальция наблюдается более высокая растворимость извести [14, 15], что положительно сказывается на взаимодействии составляющих керамзитовой пыли с гидроксидом кальция, стимулируя реакции гидратации. При этом ионы хлора внедряются в решетку алюмината и силиката кальция с образованием гидротрихлорида алюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaCl}_2 \cdot 30\text{H}_2\text{O}$, который представляет собой бесцветные пластинчатые кристаллы, видимые на снимке микроструктуры образца (рис. 4) [11].

Микроанализ пластинчатых новообразований, приведенный на рис. 5, показал наличие Al, Ca, Si, O, Cl, входящих в состав гидрохлорида алюмината кальция.

Предел прочности при сжатии стандартных кубиков $7 \times 7 \times 7$ см на 14-е сут составил 1,7 МПа.

Выводы

На основании анализа результатов проведенных исследований установлено, что в составе керамзитовой пыли содержится аморфный мелкодисперсный кремнезем и негашеная известь, обуславливающие ее гидравлическую активность. Основным продуктом гидратации при затворении керамзитовой пыли водой является низкоосновный гидросиликат кальция. При затворении керамзитовой пыли раствором хлорида кальция формируются кристаллы гидротрихлорида алюмината кальция с образованием крупнокристаллических сростков, обеспечивающих дополнительное упрочнение структуры геополимерной системы. Полученные геополимерные композиции могут найти эффективное применение для приготовления инъекционных смесей при уплотнении и упрочнении структуры грунтов различного вида.

Список литературы

1. Кузнецов В.В. Физическая и коллоидная химия. М.: Высшая школа, 1968. 390 с.
2. Ананьев В.П., Потапов А.Д. Инженерная геология. М.: Высшая школа, 2002. 511 с.
3. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов. М.: Стройиздат, 2010. 226 с.
4. Haihua Y., Liang L., Wu Y., Hanlong L., Waqas A., Ayaz A., Fahid A., Panuwat J. A comprehensive overview of geopolymers composites: A bibliometric analysis and literature review // *Case Studies in Construction Materials*. 2021. Vol. 16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00830>
5. Фаликман В.Р., Охотникова К.Ю. Геополимерные вяжущие и бетоны в современном строительстве // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015. № 4 (35). Ч. 1. С. 93–97.
6. Струк К.В., Бутенко Ю.В., Батаршин В.О. Геополимерные бетоны. *Фундаментальные основы строительного материаловедения: Сборник докладов Международного онлайн-конгресса*. 2017. С. 395–402.
7. Корнеев В.И., Брыков А.С. Перспективы развития общестроительных вяжущих веществ. Геополимеры и их отличительные особенности // *Цемент и его применение*. 2010. № 2. С. 51–55.
8. Онацкий С.П. Производство керамзита. М.: Стройиздат, 1971. 312 с.
9. Болдырев А.С., Золотов П.П., Люсов А.Н. и др. Строительные материалы: Справочник. М.: Стройиздат, 1989. 568 с.
10. Князева С.А., Яковлев Г.И., Харченко И.Я., Саидова З.С., Александров А.М., Пудов И.А., Стивенс А.Э., Бабаев А.И., Семёнова С.Н. Геополимерное вяжущее на основе керамзитовой пыли для инъекционных смесей в геотехническом строительстве // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-63-68>.
11. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1981. 335 с.
12. Зырянов М.С., Ахметжанов А.М., Урбанов А.В. Определение пуццолановой активности природных минеральных добавок. *Закономерности и тенденции инновационного развития общества: Сборник статей Международной научно-практической конференции*. 2016. С. 28–31.
13. Жерновой Ф.Е., Мирошников Е.В. Комплексная оценка факторов повышения прочности цементного камня добавками ультрадисперсного перлита // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2009. № 2. С. 55–60.
14. Осин Б.В. Негашенная известь как новое вяжущее вещество. М.: Промстройиздат, 1954. 384 с.
15. Быкова А.А., Мишанов А.А. Пути решения экологических проблем при производстве хлористого кальция // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2014. Вып. 2. С. 311–318.

References

1. Kuznetsov V.V. Fizicheskaya i kolloidnaya khimiya [Physical and colloidal chemistry]. Moscow: Vysshaya shkola. 1968. 390 p.
2. Anan'ev V.P., Potapov A.D. Inzhenernaya geologiya [Engineering Geology]. Moscow: Vysshaya shkola. 2002. 511 p.
3. Malinin A.G. Struinaya tsementatsiya gruntov [Jet-grouting of soils]. Moscow: Stroyizdat. 2010. 226 p.
4. Haihua Y., Liang L., Wu Y., Hanlong L., Waqas A., Ayaz A., Fahid A., Panuwat J. A comprehensive overview of geopolymers composites: A bibliometric analysis and literature review. *Case Studies in Construction Materials*. 2021. Vol. 16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00830>
5. Falikman V.R., Ohotnikova K.YU. Geopolymer binders and concretes in modern construction. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2015. No. 4 (35). Part 1, pp. 93–97. (In Russian).
6. Struck K.V., Butenko Yu.V., Batarshin V.O. Geopolymer concretes. *Fundamentals of building materials science. Collection of reports of the International Online Congress*. 2017, pp. 395–402. (In Russian).
7. Korneev V.I., Brykov A.S. Development prospects of general construction binders. Geopolymers and their distinctive features. *Cement i ego primeneniye*. 2010. No. 2, pp. 51–55. (In Russian).
8. Onatsky S.P. Proizvodstvo keramzita [Production of expanded clay]. Moscow: Stroyizdat. 1971. 312 p.
9. Boldyrev A.S., Zolotov P.P., Lyusov A.N. i dr. Stroitel'nye materialy. Spravochnik. [Construction materials. Reference guide]. Moscow: Stroyizdat. 1989. 568 p.
10. Knyazeva S.A., Yakovlev G.I., Harchenko I.Ya., Saidova Z.S., Alexandrov A.M., Pudov I.A., Stevens A.E., Babaev A.I., Semyonova S.N. Geopolymer binder on the basis of expanded clay dust for injection mixtures in geotechnical construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 5, pp. 63–68. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-63-68>
11. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savel'ev V.G. Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv [Methods of physico-chemical analysis of binders]. Moscow: Vysshaya shkola. 1981. 335 p.
12. Zyryanov M.S., Akhmetzhanov A.M., Urbanov A.V. Determination of pozzolanic activity of natural mineral supplements. *Patterns and trends of innovative development of society. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference*. 2016, pp. 28–31. (In Russian).
13. Zhernovoi F.E., Miroshnikov E.V. Comprehensive assessment of factors for increasing the strength of cement stone with additives of ultrafine perlite *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2009. No. 2, pp. 55–60. (In Russian).
14. Osin B.V. Negashenaya izvest' kak novoe vyazhushchee veshchestvo [Quicklime as a new binder]. Moscow: Promstroyizdat. 1954. 384 p.
15. Bykova A.A., Mishanov A.A. Ways to solve environmental problems in the production of calcium chloride. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2014. Iss. 2, pp. 311–318. (In Russian).

15–16 ИЮНЯ 2022
ЯРОСЛАВЛЬ, РОССИЯ
Royal Hotel Spa & Wellness

15–16 on JUNE, 2022
JAROSLAVL, RUSSIA
Royal Hotel Spa & Wellness



www.royal-hotelspa.ru

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«РАЗВИТИЕ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ»

КЕРАМТЭКС



КЛИМ КЛИНКЕР
КИРПИЧНЫЙ ЗАВОД

Посещение предприятий:

«Клим Клинкер» и «Норский Керамический завод»
Visit to Klim Klinker and Norsky brick-plant



Ознакомительный тур по ЖК «Норские резиденции»
Familiarization tour of the complex “Norsk residences”



Партнеры МИАП KERAMTEX / KERAMTEX' partners



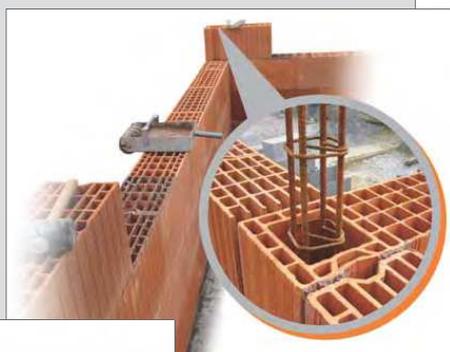
www.rifsm.ru

mail@rifsm.ru

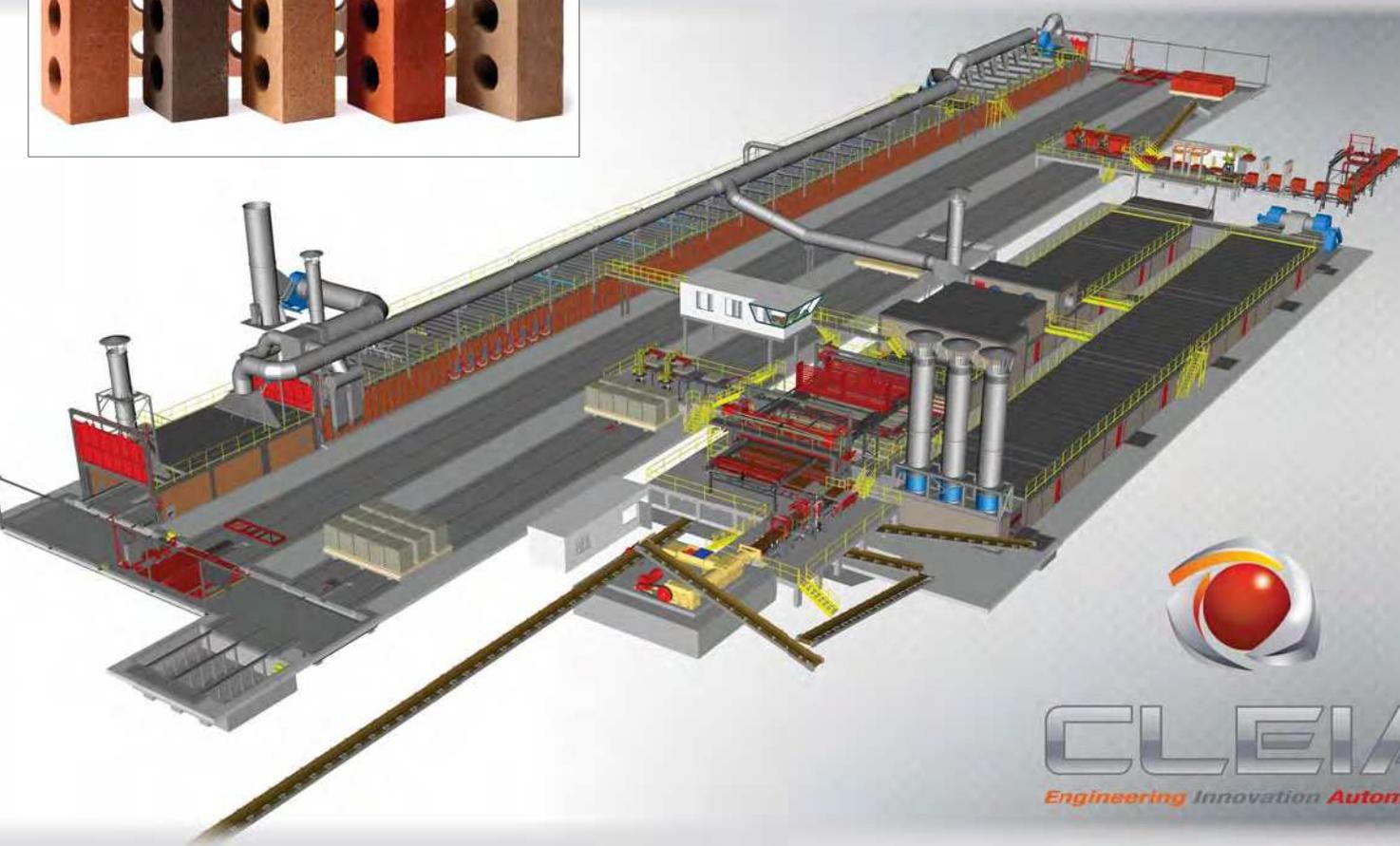
www.journal-cm.ru

Мы помогаем инвестировать в ваше будущее

- ✓ Консультирование
- ✓ Финансирование
- ✓ Проектирование & поставка заводов «под ключ»
- ✓ Модернизации заводов
- ✓ Помощь в эксплуатации



www.cleia.fr
info@cleia.fr



CLEIA
Engineering Innovation Automation

Низкое энергопотребление & Высокое качество → Прибыльность