

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)

ISSN 2658-6991 (Online)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ[®]

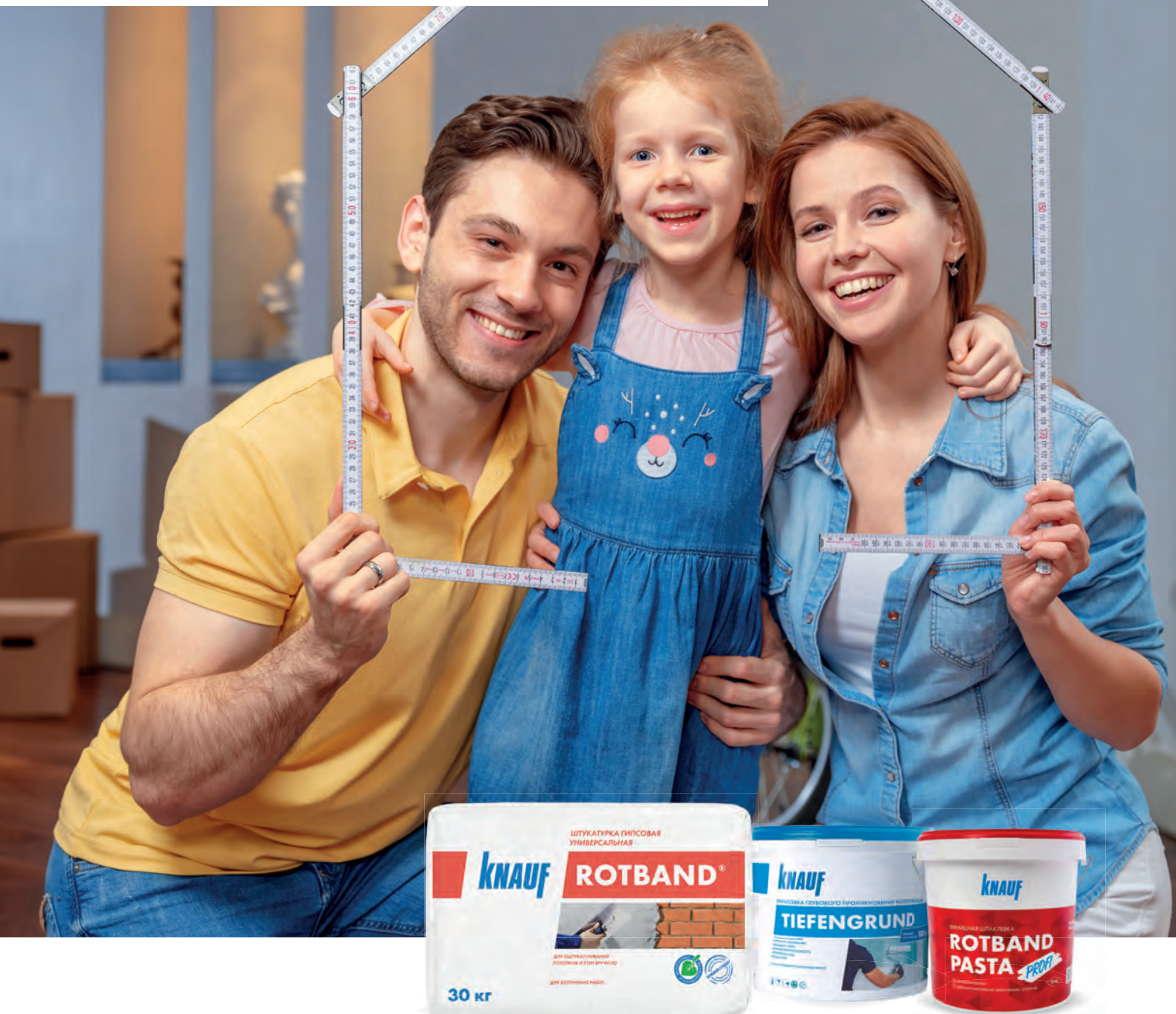
№ 9



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU СЕНТЯБРЬ 2022 г. (806)



КОМФОРТНЫЙ ДОМ ВМЕСТЕ С КНАУФ



Ремонт и отделка дома или квартиры с материалами КНАУФ – это комплексные решения любой дизайнерской идеи и строительной задачи.

www.knauf.ru
ООО «КНАУФ ГИПС»

KNAUF
Немецкий стандарт

Реклама

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®

№ 9

Основан в 1955 г. (806) Сентябрь 2022 г.

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

Нормативная база отрасли

С.Б. КРЫЛОВ, П.Д. АРЛЕНИНОВ, П.С. КАЛМАКОВА

Сравнение методов испытаний на модуль упругости бетона по российским и зарубежным нормативным документам 4

Современные вяжущие материалы

BALTIMIX-2022 – восход новых возможностей (Информация) 10

Е.Н. БОТКА

Рынок сухих строительных смесей России: итоги полугодия 15

А.О. АДАМЦЕВИЧ, А.П. ПУСТОВГАР

Аддитивное строительное производство: исследование эффекта анизотропии прочностных характеристик бетона 18

Отходы в производстве строительных материалов

«Экологические технологии переработки отходов с получением новых материалов и энергоносителей» – II Всероссийская молодежная научная школа в Тверском государственном техническом университете (Информация) 25

Р.З. РАХИМОВ

Экология, металлургия, минеральные вяжущие вещества и промышленность строительных материалов 26

М.А. МАЛЫГИНА, А.М. АЙЗЕНШТАДТ, Т.А. ДРОЗДЮК, М.А. ФРОЛОВА, М.А. ПОЖИЛОВ

Структурная модификация сапонитсодержащего материала при его механическом диспергировании 32

Материалы и технологии

В.С. ЛЕСОВИК, Р.С. ФЕДЮК, Ю.Л. ЛИСЕЙЦЕВ, И.И. ПАНАРИН, В.В. ВОРОНОВ

Влияние состава на свойства и строение модифицированных цементных композитов 39

В.Н. МОРГУН, Л.В. МОРГУН

Свойства пенобетонов при их дисперсном армировании полипропиленовыми и углеродными волокнами 50

В.Н. ДЕРКАЧ, П.А. БАКУСОВ, Р.Б. ОРЛОВИЧ

Оценка эффективности инъектирования и вычинки поврежденной каменной кладки 55

О.Б. РУДАКОВ, Д.Е. БАРАБАШ, А.Д. БАРАБАШ

Дисперсно-армированные радиационно стойкие композиты 62

На первой странице обложки: Клубный дом «Соты» (г. Уфа). Сдан в 2021 г. (Фото Т.А. Юмашевой)

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и за использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации. Редакция может опубликовать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора. Перепечатка и воспроизведение статей, рекламных и иллюстративных материалов возможны лишь с письменного разрешения главного редактора. Редакция не несет ответственности за содержание рекламы и объявлений.

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®

Founded in 1955

№ 9

(806) September 2022

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

Normative base of the industry

S.B. KRYLOV, P.D. ARLENINOV, P.S. KALMAKOVA

Comparison of Methods of Testing the Modulus of Elasticity of Concrete According to Russian and Foreign Normative Documents	4
--	----------

Modern binding materials

BALTIMIX-2022 – the Rise of New Opportunities (Information)	10
--	-----------

E.N. BOTKA

Dry Building Mixes Market in Russia: Half-Year Results	15
---	-----------

A.O. ADAMTSEVICH, A.P. PUSTOVGAR

Additive Manufacturing in Construction: the Research of the Anisotropy Concrete Strength Effect	18
--	-----------

Waste in production of building materials

"Ecological Technologies for Waste Processing with the Production of New Materials and Energy Carriers" – II All-Russian Youth Scientific School at Tver State Technical University (Information)	25
--	-----------

R.Z. RAKHIMOV

Ecology, Metallurgy, Mineral Binders and Building Materials Industry	26
---	-----------

M.A. MALYGINA, A.M. AYZENSHTADT, T.A. DROZDYUK, M.A. FROLOVA, M.A. POZHILOV

Structural Modification of Saponite-Containing Material During its Mechanical Dispersion	32
---	-----------

Materials and technologies

V.S. LESOVIK, R.S. FEDIUK, Ju.L. LISEJCEV, I.I. PANARIN, V.V. VORONOV

Influence of Composition on the Properties and Structure of Modified Cement Composites	39
---	-----------

V.N. MORGUN, L.V. MORGUN

Properties of Foam Concrete During Their Dispersed Reinforcement with Synthetic and Carbon Fibers	50
--	-----------

V.N. DERKACH, P.A. BAKUSOV, R.B. ORLOWICZ

Evaluation of the Effectiveness of Injection and Repair of Damaged Masonry	55
---	-----------

O.B. RUDAKOV, D.E. BARABASH, A.D. BARABASH

Dispersed Reinforced Radiation-Resistant Composites	62
--	-----------

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)

РУДАКОВ О.Б.,

д-р хим. наук, профессор (Воронеж)

ТРАВУШ В.И.,

д-р техн. наук, академик РААСН (Москва)

ФЕДОСОВ С.В.,

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Иваново)

СТРОКОВА В.В.,

д-р техн. наук, советник РААСН (Белгород)

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)

RUDAKOV O.B.,

Doctor of Sciences (Chemistry), professor (Voronezh)

STROKOVA V.

Doctor of Science (Engineering), Advisor of RAACS (Belgorod)

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)

УДК 624.046.4

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-4-9>

С.Б. КРЫЛОВ, д-р техн. наук,
П.Д. АРЛЕНИНОВ, канд. техн. наук (arleninoff@gmail.com),
П.С. КАЛМАКОВА, инженер

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ)
им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (109428, Москва, ул. 2-я Институтская, 6, корп. 5)

Сравнение методов испытаний на модуль упругости бетона по российским и зарубежным нормативным документам

Проанализированы основные подходы к проведению кратковременных испытаний по определению модуля упругости бетона, которые регламентирует ГОСТ 24452–80, действующий на территории Российской Федерации, а также зарубежные стандарты ISO 1920-10:2010, ASTM C469-14, BS EN 12390-10. Определены принципиальные отличия в проведении испытаний по определению модуля упругости бетона по российским и зарубежным стандартам. Значение модуля упругости является одним из основных параметров, получаемых по проводимым испытаниям в соответствии с указанными стандартами, закладывается в виде исходных данных при выполнении пространственных расчетов, а также приводится в нормативных документах типа СП, ModelCode, EuroCod и т. д., при анализе которых видна разница в значениях модулей упругости для соответствующих по прочности классов бетона. В качестве материалов и методов в статье рассматриваются размеры и формы испытываемых образцов, параметры базы измерения и типы измерительного оборудования, режимы нагружения. Приведенный анализ основных этапов проведения испытаний по определению модуля упругости бетона выявил серьезные отличия в подходах российского ГОСТ 24452–80 и зарубежных стандартов (между собой все зарубежные стандарты относительно гармонизированы, хотя также присутствуют отличия). Основные отличия – в параметрах образцов и режимах нагружения. Для дальнейшей гармонизации отечественных и зарубежных нормативных документов необходимо проведение обширных сравнительных испытаний образцов разных форм и размеров с режимами нагружения по каждому из стандартов для каждого типа образцов.

Ключевые слова: бетон, модуль упругости, методы испытаний.

Авторы статьи выражают благодарность руководству и сотрудникам лабораторий № 16 и 13 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева за помощь в подготовке и проведении испытаний экспериментальных образцов.

Для цитирования: Крылов С.Б., Арленинов П.Д., Калмакова П.С. Сравнение методов испытаний на модуль упругости бетона по российским и зарубежным нормативным документам // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 4–9.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-4-9>

S.B. KRYLOV, Doctor of Sciences (Engineering),

P.D. ARLENINOV, Candidate of Sciences (Engineering) (arleninoff@gmail.com),

P.S. KALMAKOVA, Engineer

Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete – NIIZhB named after A.A. Gvozdev,
JSC “Research Center “Construction” (building 5, 6, 2nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

Comparison of Methods of Testing the Modulus of Elasticity of Concrete According to Russian and Foreign Normative Documents

The main approaches to conducting short-term tests to determine the modulus of elasticity of concrete, which are regulated by GOST 24452–80, which is in force on the territory of the Russian Federation, as well as foreign standards ISO 1920-10:2010, ASTM C469-14, BS EN 12390-10, are analyzed. To determine the fundamental differences in testing to determine the modulus of elasticity of concrete according to Russian and foreign standards. The values of the modulus of elasticity one of the main parameters, obtained from the tests carried out in accordance with the specified standards, are laid down as initial data when performing spatial calculations and given in regulatory documents such as SP, ModelCode, EuroCod, etc., the analysis of which shows the difference in the values of the elastic moduli for the corresponding strength classes of concrete. Materials and methods: the article discusses the dimensions and shapes of the tested samples, the parameters of the measurement base and the type of measuring equipment, loading modes. The analysis of the main stages of testing to determine the modulus of elasticity of concrete given in the article revealed serious differences in the approaches of the Russian GOST 24452–80 and foreign standards (all foreign standards are relatively harmonized among themselves, although there are also differences). The main differences in the parameters of the samples and loading modes. For further harmonization of domestic and foreign regulatory documents, it is necessary to conduct extensive comparative tests of samples of different shapes and sizes with loading modes for each of the standards for each type of samples.

Keywords: concrete, modulus of elasticity, method of testing.

The authors express their gratitude to the management and staff of laboratories No. 16 and No.13 of NIIZhB named after A.A. Gvozdev for their help in the preparation and testing of experimental samples.

For citation: Krylov S.B., Arleninov P.D., Kalmakova P.S. Comparison of methods of testing the modulus of elasticity of concrete according to Russian and foreign normative documents. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 4–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-4-9>

Нормативным документом в РФ, регламентирующим проведение испытаний по определению модуля упругости бетона, является ГОСТ 24452–80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» [1]. Данный стандарт был выпущен почти 40 лет назад в 1980 г. и с того времени не актуализировался. В 2020–2021 гг. в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева была проведена работа по актуализации стандарта.

Иностранные стандарты по методам определения модуля упругости бетона выпускаются регулярно, поскольку исследований модуля упругости бетона за рубежом в последнее время проводилось значительно больше, чем в нашей стране [2–8]. В первую очередь это стандарты промышленно развитых стран (американские, европейские и общемировые):

- международный стандарт ISO 1920-10 Testing of concrete-Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression [9];

- британский стандарт BS EN 12390-13 Testing hardened concrete Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression [10];

- американский стандарт ASTM C469/C469-M Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression [11].

И в настоящее время уже накопились принципиальные отличия в методиках проведения испытаний за рубежом и регламентируемых ГОСТ 24452–80. Ниже приведена сравнительная оценка основных нормируемых параметров при испытаниях для каждого из указанных стандартов.

Размеры и формы образцов:

- ГОСТ 24452–80 регламентирует использование образцов-призм и образцов-цилиндров с шириной или диаметром (d) образцов, равным 70, 100, 150, 200 и 300 мм. Отношение длины образца l к ширине d соответствует $l/d=4$. За базовый образец принимают образец с размерами $150 \times 150 \times 600$ мм, но при этом отсутствует таблица с переходными коэффициентами для других типоразмеров образца по аналогии с ГОСТ 24544–81 «Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести». Минимальное количество образцов в серии должно быть не менее трех;

- ISO 1920-10:2010 регламентирует использование образцов-цилиндров с минимальным диаметром (d), равным 100 мм или $4 \times d_{max}$ размер заполнителя. За базовый образец принимается 100×200 мм. Минимальное количество образцов в серии должно быть не менее пяти;

- BS EN 12390-10 регламентирует использование образцов-призм и образцов-цилиндров шириной или диаметром (d), равным $3,5 \times d_{max}$ размер заполнителя. Отношение длины образца l к ширине d соответствует $2 \leq l/d \leq 4$. Количество образцов в серии не нормируется;

- ASTM C469–14 регламентирует использование образцов-цилиндров с диаметром $d \geq 94$ мм. Отношение длины образца l к ширине d соответствует

$1,9 \leq l/d \leq 2,1$. Количество образцов в серии не нормируется.

Максимальное нагружение образцов:

- ГОСТ 24452–80 регламентирует максимальное нагружение, равное $40 \pm 5\%$ от разрушающей нагрузки. При этом нагружение следует производить ступенями с шагом в 10% с выдержкой на каждой ступени 4–5 мин. Скорость нагружения на образец должна быть в пределах $0,6 \pm 0,2$ МПа/с;

- ISO 1920-10:2010 регламентирует максимальное нагружение, равное $1/3$ разрушающей нагрузки. Нагружение должно быть выполнено не менее двух раз на образец. Скорость нагружения должна быть от 0,2 до 0,6 МПа/с;

- BS EN 12390-10 регламентирует максимальное нагружение, равное $1/3$ разрушающей нагрузки. Нагружение должно быть выполнено не менее трех раз на образец. Скорость нагружения должна быть в пределах $0,6 \pm 0,2$ МПа/с;

- ASTM C469–14 регламентирует максимальное нагружение, равное 40% от разрушающей нагрузки. Нагружение должно быть выполнено не менее трех раз на образец. Скорость нагружения должна быть в пределах $0,25 \pm 0,05$ МПа/с.

База измерения:

- ГОСТ 24452–80 регламентирует установку приборов для измерения деформаций по четырем граням призмы или по 3–4 образующим цилиндра, развернутым под углом $90-120^\circ$;

- ISO 1920-10:2010 регламентирует измерительные приборы, которые должны иметь измерительную базу не менее $1/3$ испытываемого образца, также база не должна превышать размер диаметра цилиндра. Приборы для измерения деформаций должны быть закреплены таким образом, чтобы точки замера находились на одинаковом расстоянии от двух концов образца и на расстоянии от края не менее $1/4$ длины испытываемого образца. Измерения должны проводиться не менее чем на двух противоположных сторонах образца;

- BS EN 12390-10 регламентирует использовать приборы для измерения деформаций, которые должны располагаться так, чтобы измерительная база находилась в эквивалентном расстоянии от торцов образца. Необходимо использовать минимум два прибора для измерения деформаций, которые должны быть расположены симметрично относительно центральной оси;

- ASTM C469–14 регламентирует использовать компрессометр для измерения деформаций, который устанавливают на двух диаметрально противоположных габаритных линиях образца, каждая параллельна центральной оси, при этом каждый компрессометр центрируется непосредственно посередине образца.

Проведение испытания:

- ГОСТ 24452–80 регламентирует следующий ход испытания:

- образец устанавливают на нижнюю платформу испытательной машины;

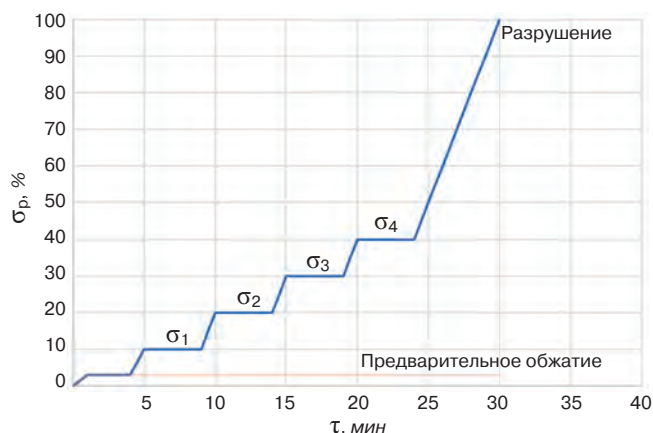


Рис. 1. Схема проведения испытания по ГОСТ 24452-80

Fig. 1. Test scheme according to GOST 24452-80

— изначальное обжатие образца 2% от разрушающей нагрузки;

— при центрировании образца его нагружают до 40% от разрушающей нагрузки, снимают показания датчиков измерения деформации. При этом отклонение деформации по каждой грани должно быть не более 15% их среднего арифметического значения, после чего нагрузку снимают (если условие не соблюдается, образец разгружается, смещается относительно центральной оси и вновь производится нагружение. Если после пяти попыток не выполнено условие, то образец отбраковывают);

— при определении модуля упругости нагружение образца происходит до уровня нагрузки, равной $40 \pm 5\%$ от разрушающей нагрузки;

— нагружение следует проводить ступенями, равными 10% от ожидаемой разрушающей нагрузки, со скоростью $0,6 \pm 0,2$ МПа/с при выдержке одной ступени 4–5 мин.

На рис. 1 в графическом виде представлена схема проведения испытания.

• ISO 1920-10:2010 регламентирует следующий ход испытания:

— образец для испытания помещают по центру машины с прикрепленными измерительными приборами в осевом направлении;

— прикладывают напряжение $0,5 \text{ МПа} = \sigma_b$;

— выдерживают напряжение σ_b в течение 60 с;

— измеряют и записывают деформацию по показаниям манометра, снятым с каждой линии измерения;

— увеличивают напряжение с постоянной скоростью в диапазоне от 0,2 до 0,6 МПа до тех пор, пока напряжение не будет равно $1/3$ прочности цилиндра ($\sigma_a = F_c/3$);

— выдерживают напряжение в течение 60 с, после чего в течение следующих 30 с снимают показания деформации на каждой линии измерения;

— если отдельные деформации не находятся в диапазоне $\pm 20\%$ от их среднего арифметического значения при σ_a , то образец поворачивают и повторяют испытание. Если невозможно уменьшить различия в

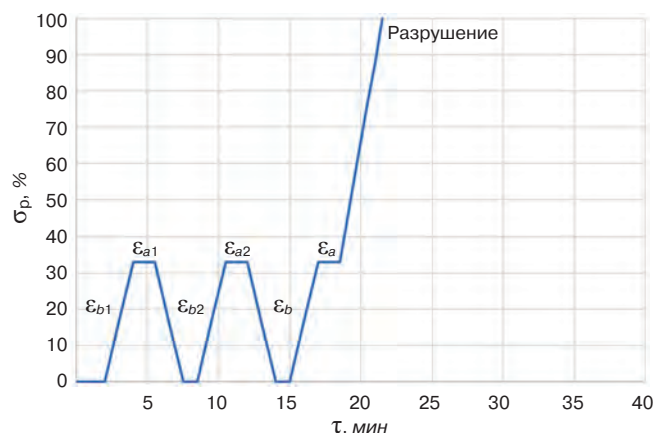


Рис. 2. Схема проведения испытания по ISO 1920-10:2010

Fig. 2. Test scheme according to ISO 1920-10:2010

пределах этого диапазона, то испытание прекращается;

— после центрирования образца снижают нагрузку с той же скоростью, что и при загрузке до уровня σ_b ;

— выполняют не менее двух дополнительных циклов предварительной нагрузки, используя ту же скорость загрузки и разгрузки, и поддерживают напряжение σ_b и σ_a постоянным в течение 60 с;

— после завершения последнего цикла предварительного нагружения и периода ожидания 60 с при напряжении $\sigma_b = 0,5 \text{ МПа}$ записывают показания ϵ_b в течение последующих 30 с;

— повторно нагружают образец до напряжения σ_a , выдерживают его в течение 60 с и записывают показания ϵ_a , снятые в течение 30 с;

— когда все измерения упругости будут завершены, снимают измерительные приборы и нагружают образец до полного разрушения.

На рис. 2 в графическом виде представлена схема проведения испытания.

• BS EN 12390-13:2013 регламентирует следующий ход испытания:

— помещают образец для испытания с измерительными приборами по центру испытательной машины;

— для первого нагружения (цикла) к образцу прикладывают напряжение со скоростью $0,6 \pm 0,2 \text{ МПа/с}$ до нижнего значения напряжения σ_b (нижнее напряжение с произвольным значением от 10 до 15% от F_c);

— выдерживают нижнее напряжение в пределах $\pm 5\%$ от номинального значения в течение периода, не превышающего 20 с;

— записывают нижнее значение σ_b^m ;

— снижают напряжение со скоростью $0,6 \pm 0,2 \text{ МПа/с}$ до напряжения предварительного обжатия σ_p (номинальное напряжение предварительного обжатия — произвольное значение от 0,5 МПа до σ_b);

— Удерживают предварительное обжатие в течение 20 с;

— В конце этого периода обнуляют показания приборов для измерения деформации;

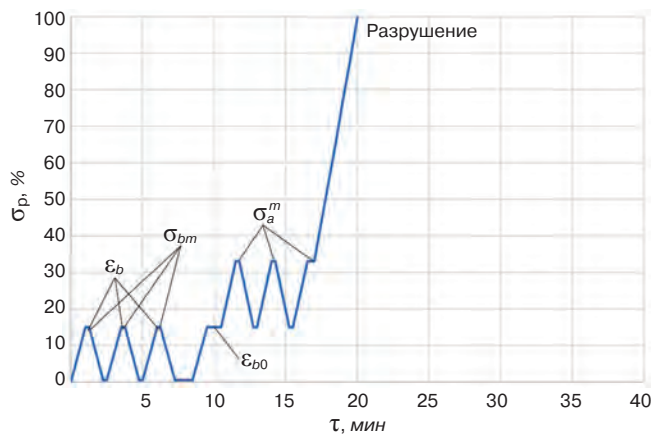


Рис. 3. Схема проведения испытания по BS EN 12390-13:2013
Fig. 3. Test scheme according to BS EN 12390-13:2013

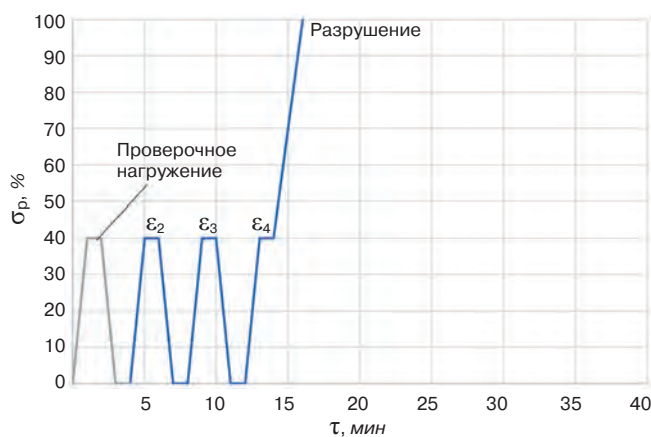


Рис. 4. Схема проведения испытания по ASTM C469-14
Fig. 4. Test scheme according to ASTM C469-14

— повторяют указанные выше действия еще два раза (два цикла);

— в конце каждого (второго и третьего) цикла при более низком уровне напряжения записывают деформацию ϵ_b вдоль каждой линии измерения;

— после трех циклов поддерживают напряжение предварительной нагрузки в пределах $\pm 5\%$ от номинального значения и в течение 60 с выполняют следующие проверки:

— первая проверка: на каждой линии измерения отклонение ϵ_b от второго цикла к третьему не должно превышать 10% (если разница деформаций превышает 10%, останавливают испытание, центрируют измерительные приборы и образец и повторяют испытание заново);

— вторая проверка: деформации ϵ_b в третьем цикле на всех измерительных линиях не должны отличаться от их среднего значения более чем на 20%;

— увеличивают напряжение со скоростью $0,6 \pm 0,2$ МПа/с от напряжения предварительного обжатия до низкого уровня напряжения;

— удерживают меньшее напряжение в пределах $\pm 5\%$ от номинального значения в течение не более 20 с. В конце этого периода фиксируют деформацию вдоль каждой линии измерения и рассчитыва-

ют среднюю деформацию ϵ_{b0} на этом уровне напряжения;

— при удовлетворительных проверках, описанных выше, продолжают испытания. Выполняют три цикла загрузки с увеличением напряжения в образце;

— для каждого цикла увеличивают прикладываемое напряжение к образцу со скоростью $0,6 \pm 0,2$ МПа/с до верхнего предела, достигая значения $\sigma_a = F_c/3$;

— удерживают верхнее напряжение в пределах $\pm 5\%$ от номинального значения в течение периода, не превышающего 20 с;

— для первого и второго циклов уменьшают напряжение со скоростью $0,6 \pm 0,2$ МПа/с до нижнего уровня напряжения;

— удерживают нижнее напряжение в пределах $\pm 5\%$ от номинального значения в течение не более 20 с;

— в конце фазы верхнего напряжения первого и третьего циклов, когда нагрузка стабильна, записывают соответствующие деформации вдоль каждой измерительной линии и вычисляют средние деформации ϵ_{a1} и ϵ_{a3} на этих уровнях напряжения;

— в конце фазы нижнего напряжения второго цикла и когда нагрузка стабилизирована, записывают значение деформации вдоль каждой линии и рассчитывают среднюю деформацию ϵ_{b2} на этом уровне напряжения;

— записывают значение верхнего напряжения σ_a^m ;

— когда все измерения завершены на верхнем уровне напряжения третьего цикла нагружения, определяют прочность образца при сжатии, предварительно сняв все приборы измерения деформации, путем монотонной загрузки образца до разрушения;

— записывают предел прочности при сжатии.

На рис. 3 в графическом виде представлена схема проведения испытания.

• ASTM C469–14 регламентирует следующий ход испытания:

— помещают образец с присоединенным оборудованием для измерения деформации на нижнюю плиту или опорный блок испытательной машины;

— нагружают образец не менее трех раз;

— не записывают никаких данных во время первого нагружения;

— прикладывают нагрузку монотонно с постоянной скоростью 250 ± 50 кПа/с;

— нагружают образец до тех пор, пока нагрузка не составит 40% от среднего значения предела прочности при сжатии сопутствующей серии образцов;

— во время первого нагружения необходимо устранить все дефекты крепления или центровки, которые могут вызвать ошибочные результаты;

— для второго и последующего нагружения записывается приложенная нагрузка и продольная деформация в точке, когда приложенная нагрузка равна приблизительно 40% от разрушающей нагрузки.

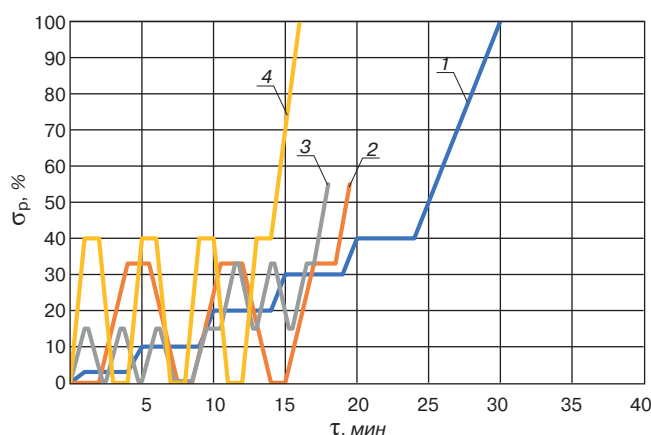


Рис. 5. Сравнительный график методов проведения испытаний по определению модуля упругости по: 1 – ГОСТ 24452–80; 2 – ISO 1920:10–2010; 3 – BS EN 12390-13:2013; 4 – ASTM C469-14

Fig. 5. Comparative schedule of test methods for determining the modulus of elasticity according to: 1 – GOST 24452–80; 2 – ISO 1920:10–2010; 3 – BS EN 12390-13:2013; 4 – ASTM C469-14

На рис. 4 в графическом виде представлена схема проведения испытаний.

Заключение

Приведенный анализ основных этапов проведения испытаний по определению модуля упругости выявил серьезные отличия в подходах российского ГОСТ 24452–80 и зарубежных стандартов (между собой все зарубежные стандарты относительно гармонизированы, хотя также присутствуют отличия).

Во-первых, это параметры образцов – принципиальные отличия в отношении ширины/диаметра образца к его высоте (для ГОСТ 24452–80 отношение 1/4, для зарубежных стандартов 1/2).

Вторым значимым отличием являются режимы нагружения: западные стандарты регламентируют монотонное нагружение в отличие от ступенчатого в ГОСТ 24452–80 и, помимо этого, регламентируют несколько циклов нагрузка/разгрузка со снятием показаний на последних циклах. На рис. 5. приведены схемы нагружения по всем рассмотренным стандартам, сведенные в одних координатах.

Выявленные отличия при проведении испытаний могут оказывать влияние на получаемые результаты, что, в свою очередь, может привести к разнице значений модулей упругости для соответствующих по прочности классов бетона по российским нормам и зарубежным. Также это важно, поскольку в зарубежных нормативных документах [12, 13], помимо табличных значений модуля упругости (в зависимости от класса бетона), можно получить расчетным путем значения модуля на более прочных заполнителях в любом возрасте и т. д. По российским нормам [14] такие результаты можно получить только путем испытаний.

Для дальнейшей гармонизации отечественных и зарубежных нормативных документов, регламентирующих проведение испытаний по определению модуля упругости, необходимо проведение обширных

сравнительных испытаний образцов разных форм и размеров с режимами нагружения по каждому из стандартов. Это упростит работы в совместных международных проектах по строительству, а также позволит повысить точность определения нормативных значений модуля упругости, что улучшит экономическую составляющую массового жилищного строительства.

Список литературы / References

1. ГОСТ 24452–80 Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Введен постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 18 ноября 1980 г. № 177 – дата введения 1982-01-01.
2. Назуев М.П., Джамилова П.М., Батаева Ф.А., Бакаев З.И., Кукаев А.Х., Османов А. Влияние режимов виброцентрифугирования на свойства получаемых бетонов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2021. С. 8–19.
2. Nazhuyev M.P., Dzhamilova P.M., Bataeva F.A., Bakaev Z.I., Kukaev A.Kh., Osmanov A. Influence of vibrocentrifugation modes on the properties of the resulting concretes. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021, pp. 8–19. (In Russian).
3. Свиридов Н.В., Коваленко М.Г., Чесноков В.М. Механические свойства особо прочного цементного камня // *Бетон и железобетон*. 1991. № 2. С. 7–9.
3. Sviridov N.V., Kovalenko M.G., Chesnokov V.M. Mechanical properties of especially strong cement stone. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 1991. No. 2, pp. 7–9. (In Russian).
4. Qirui Luo, Wei Wang, Zhuangzhuang Sun, Bingjie Wang, Shanwen Xu. Statistical analysis of mesoscopic concrete with random elastic modulus. *Journal of Building Engineering*. 2021.101850. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101850>
5. Yueyi Gao, Chuanlin Hu, Yamei Zhang, Zongjin Li, Jinlong Pan. Investigation on microstructure and microstructural elastic properties of mortar incorporating fly ash. *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 86, pp. 315–321. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.008>
6. Meenakshi Sharma, Shashank Bishnoi. Influence of properties of interfacial transition zone on elastic modulus of concrete: Evidence from micromechanical modelling. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 246. 1183814. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118381>
7. Qinghe Wang, Zhe Li, Yuzhuo Zhang, Huan Zhang, Mei Zhou, Yanfeng Fang. Influence of coarse coal

- ganguae aggregates on elastic modulus and drying shrinkage behaviour of concrete. *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 32. 101748 15. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101748>
8. Nayara S. Klein, Lauri A. Lenz, Wellington Mazer. Influence of the granular skeleton packing density on the static elastic modulus of conventional concretes. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 242. 118086 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118086>
 9. ISO 1920-10:2010 «Testing of concrete – Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression». Reviewed and confirmed in 2016. First edition 2010-09-15.
 10. BS EN 12390-13:2013 «Testing hardened concrete. Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression». This British Standard was published under the authority of the Standards Policy and Strategy Committee on 30 November 2013.
 11. ASTM C469/C469M-14 «Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression» committee C09 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (C469/C469M-10) that may impact the use of this standard (Approved March 1, 2014).
 12. fib Model Code for Concrete Structures 2010. 2013. 434 p.
 13. ТКП EN 1992-1-1:2009 (02250) Еврокод 2 «Проектирование железобетонных конструкций Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий». Утвержден и введен в действие Приказом Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 10 декабря 2009 г. № 404.
 13. ТКР EN 1992-1-1:2009 (02250) Eurocode 2 «Design of reinforced concrete structures Part 1-1. General rules and rules for buildings». Approved and put into effect by the order of the Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus dated December 10, 2009. No. 404.
 14. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». Утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 декабря 2018 г. № 832/пр – дата введения 2019-06-20.
 14. SP 63.13330.2018 «Concrete and reinforced concrete structures. Basic Provisions». Approved by Order of the Ministry of Construction, Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 19, 2018 No. 832/pr. Date of introduction 2019-06-20. (In Russian).



RDF
RUSSIAN
DEMOLITION
FORUM 2022

12-13 ОКТЯБРЯ

ОТЕЛЬ HOLIDAY INN ЛЕСНАЯ

МОСКВА, УЛ. ЛЕСНАЯ, Д. 15

3-Й МЕЖДУНАРОДНЫЙ ДЕМОНТАЖНЫЙ ФОРУМ РОССИИ!

ПОДРОБНОСТИ НА САЙТЕ:
RUSDEMOLITION.RU

+7 (977) 304 1676
INFO@RUSDEMOLITION.RU

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:







BALTIMIX 2022 – ВОСХОД НОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

У Ф А 2022

BALTIMIX-2022 – the Rise of New Opportunities

23–25 августа 2022 г. в Уфе (Республика Башкортостан) состоялась 22-я Международная конференция производителей сухих строительных смесей.

Организатором конференции традиционно выступает ивент-агентство КВИНТЕТ (Санкт-Петербург) при научной поддержке Научно-исследовательского института строительных материалов и технологий НИУ МГСУ (Москва) и участии Российской гипсовой ассоциации, ассоциации «Союз производителей сухих строительных смесей». Региональными партнерами конференции выступили Архитектурно-строительный институт УГНТУ (Уфа) и компания «Цементные технологии», которая приняла участников мероприятия на своей производственной площадке.

Генеральным спонсором конференции стала машиностроительная компания HAVER&BOECKER (Российское представительство). Официальными спонсорами выступили российские производители химических добавок ГК «Полипласт» (г. Новомосковск) и НПК «Химпром» (Пермь). Партнером также выступила Фабрика трогательных стенов (Екатеринбург).

On August 23–25, 2022, the 22nd International Conference of Dry Building Mix Manufacturers took place in Ufa (Republic of Bashkortostan).

The conference is traditionally organized by the KVINTET event agency (St. Petersburg) with the scientific support of the Research Institute of Building Materials and Technologies NRU MGSU (Moscow) and the participation of the Russian Gypsum Association, the Union of Producers of Dry Building Mixes. Regional partners of the conference were the Institute of Architecture and Construction of USPTU (Ufa) and the Cement Technologies Company, which hosted the participants of the event at its production site.

The general sponsor of the conference was the engineering company HAVER&BOECKER (Russian representation). The official sponsors were the Russian manufacturers of chemical additives, Polyplast Group (Novomoskovsk) and NPK Khimprom (Perm). The Touching Stand Factory (Yekaterinburg) also acted as a partner.

BALTIMIX-2022 побил рекорды по количеству участников: более 230 представителей из 121 компании, 43 из которых – непосредственные производители сухих строительных смесей. Несмотря на сложившуюся ситуацию, качественный состав конференции сохранил международный статус: в Уфу приехали представители России, Армении, Казахстана, Китая и Турции.

Конференция BALTIMIX каждый год открывает для своих участников новые российские города, ведь заводы – производители ССС расположены по всей территории РФ. За 22 года существования мероприятие превратилось в экспертную площадку, где встречаются специалисты для обсуждения важнейших отраслевых тем.

Основными вопросами конференции, конечно, явились сложившаяся ситуация на рынке ССС и пути дальнейшего развития отрасли.

О состоянии строительной отрасли в целом и ситуации на рынке сухих строительных смесей в изменившихся условиях рассказали в своих выступлениях директор НИИ СМиТ НИУ МГСУ **А.П. Пустовгар** и управляющий Ассоциацией «Союз производителей сухих строительных смесей» **Р.Н. Борисов**.

Было отмечено, что существенное удорожание строительных материалов началось в 2021 г., хотя рост стоимости ССС был не столь значителен в сравнении с металлом, арматурой, изделиями из дерева и составил 15–20%. С начала 2022 г. ССС в среднем подорожали на 20%, при этом в объемном соотношении в первом квартале 2022 г. по некоторым позициям был рост в двухзначном процентном выражении, но обвал ипотечного кредитования в апреле привел к падению потребления ССС более чем на 20%. По итогам семи месяцев 2022 г. падение в среднем по рынку составляет 7–8% в тоннаже относительно прошлого года. При этом ситуация с рентабельностью производств обстоит неплохо, так как в денежном эквиваленте производители увеличили свои доходы.



С приветственным словом от организаторов выступила директор по развитию ООО «КВИНТЕТ» **М.Г. Суслова**



Машиностроительная компания HAVER&BOECKER (генеральный партнер конференции) основана в 1887 г. в Германии, специализируется на выпуске оборудования для упаковки сыпучих материалов. За последние 50 лет компания поставила заказчикам более 3,5 тыс. роторных упаковщиков. Менеджер отдела проектов «Цемент» компании **Я.А. Федорович** представил участникам линейку выпускаемых машин, а также ответил на вопросы, касающиеся импорта запчастей и комплектующих в условиях санкций





Исполнительный директор РГА **А.Ф. Бурьянов** вручил памятный знак ассоциации представителю турецкой компании Parget Makina **Джевдету Карайбрахимоглу**. Компания Parget Makina реализует в России модернизацию существующих заводов; инжиниринг, проектирование, техническое консультирование; автоматизацию производства; шеф-монтаж, пусконаладку и ввод в эксплуатацию; разработку рецептуры в соответствии с особенностями сырья и пр.



Оборудование компании WAMGROUP – разработчика и производителя оборудования и компонентов для работы с сыпучими материалами представил руководитель направления **Д.И. Горобцов**



Представители научного сообщества: д-р техн. наук, профессор **В.Б. Петропавловская** (Тверь), доклад которой о высокодисперсном зольном наполнителе для цементных и гипсовых композиций вызвал большой интерес участников и активную дискуссию, и канд. техн. наук, директор НИИ СМИТ НИУ МГСУ **А.П. Пустовгар** – научный руководитель конференции



Научно-технический журнал «Строительные материалы»® является многолетним информационным партнером конференции BALTIMIX. Участие в подобных мероприятиях позволяет представить журнал более широкой аудитории специалистов-производственников, пообщаться с коллегами, выявить прикладные научные тренды и, конечно, пообщаться с коллегами (научный редактор журнала **Т.А. Абакумова** и директор Архитектурно-строительного института УГНТУ **Д.В. Кузнецов**)



Специалист отдела продаж химреактивов НПК «Химпром» **К.И. Гусар** продемонстрировал участникам возможность использования продукта компании – модифицированного крахмала в качестве загустителя, связующего вещества, водоудерживающей добавки для систем на минеральной основе. Проведенные исследования показали, что разработанная добавка по функциональным свойствам идентична европейским аналогам, а по ряду показателей их превосходит

Особое внимание было уделено теме развития отраслевого бизнеса в новых экономических реалиях и выхода из кризиса, связанного с пандемией. С оценкой состояния рынка ССС и перспективами выступил генеральный директор компании «Строительная информация» **Е.Н. Ботка** (подробнее читайте на стр. 15).

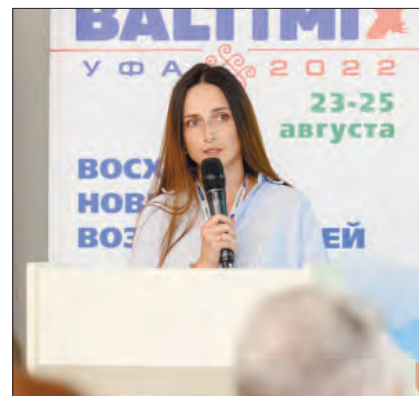
Наиболее живой интерес участников вызвали доклады производителей и импортеров добавок для сухих строительных смесей, так как в условиях сложной логистической ситуации и сокращения поставок сырьевых компонентов у производителей смесей остро стоит вопрос адаптации рецептур, внедрения новых компонентов, подбора составов смесей, не уступающих по качеству и соответствующих заявленным характеристикам.

О состоянии рынка редиспергируемых полимерных порошков (РПП) рассказал представитель ГК «Полипласт» **Е.А. Удинцев**. Как было отмечено, основными проблемами в данный момент являются резкий дефицит РПП на российском рынке, в том числе из-за проблем с логистикой; отсутствие гидрофобных и эластичных РПП для фасадных теплоизоляционных композитных систем, а также сильная волатильность цен и, следовательно, невозможность адекватного планирования. Объем импорта РПП в первом полугодии 2022 г. рухнул с марта более чем в три раза к аналогичному периоду 2021 г. (в тоннах), при этом спрос на готовую продукцию не уменьшается. Вариантами выхода из этой сложной ситуации должны стать тотальное импортозамещение, разработка и внедрение отечественных аналогов, а также стабилизация и регулирование цен.

Химические продукты компании «Хома» – российского производителя полимерных продуктов и клеевых материалов были презентованы руководителем исследовательского центра стирол-акриловых дисперсий **С.В. Анисимовой**. Все продукты разрабатываются в



А.В. Ружицкая, руководитель технического маркетинга компании Holcim Russia (Москва), представила пути реализации и план компании стать национальным лидером в отрасли по формированию «Зеленой повестки и снижению выбросов CO₂, а также стремления стать лидером рынка по производству «зеленых» продуктов и решений



Остро стоят вопросы устойчивого развития и углеродной нейтральности. Технический менеджер компании «Вакер Хими Рус» (Москва) **А.А. Клементьева** рассказала, что для компании устойчивость имеет два основных направления: улучшение собственных процессов и продуктов и помощь клиентам внедрять технологии будущего в свои производственные процессы



Особенности применения сухих строительных смесей в строительной 3D-печати, исследование свойств готовых изделий и перспективы применения данного вида строительства представил в своем докладе канд. техн. наук, заместитель директора НИИ СМиТ **А.О. Адамцевич** (более подробно читайте на стр. 18)



Основной «пострадавший» от санкций сегмент добавок для ССС – редиспергируемые порошки. Генеральный директор ООО «Аддитив плюс» (Москва) **П.Г. Василик** предложил участникам конференции вариант решения проблемы за счет реэкспорта



Главный инженер проекта РПП и ССС АО «Пигмент» (Тамбов) **Д.И. Кожемякин** представил участникам линейку производимой продукции, рассказал об особенностях ее производства и ответил на ряд вопросов от технологов о поведении продуктов в составе композиций

научном комплексе компании. Подобранные рецептуры проходят испытания на современном лабораторном оборудовании, проводятся натурные испытания в реальных условиях перед запуском в основное производство.

Добавки иностранных производителей также не покинули российский рынок. Специалист технической поддержки компании Bang and Bonsomer (Банг и Бонсомер, Ростов-на-Дону) **А.Г. Землянская** представила участникам эфиры целлюлозы Landcel, которые производятся в Китае и используются для различных видов продукции: штукатурных смесей на цементном и гипсовом вяжущем; смесей сухих строительных шпатлевочных на гипсовом и цементном вяжущем; смесей сухих строительных клеевых на цементном вяжущем и др.

Не меньший интерес вызвал блок докладов представителей машиностроительного сектора. Приятно отметить, что наравне с иностранными производителями на рынке активно используется российское оборудование.

Один из крупнейших производителей отечественного оборудования – машиностроительная компания ВСЕЛУГ занимается разработкой, производством, поставкой и пуском в эксплуатацию оборудования и технологических комплексов для работы с сыпучими продуктами. Компания располагает собственными конструкторским, технологическим и АСУТП отделами, службой сервиса и наладки и производством (Фокинский машиностроительный завод ВСЕЛУГ). На конференции руководитель направления «Строительные материалы» **В.А. Распопов** подробно остановился на оборудовании для паллетоупаковки.

Генеральный директор завода ССС «Брозэкс» (г. Березовский Свердловской обл.) **Д.Н. Гуреев** рассказал о внедрении в производство двухконтурного сушильного барабана с охлаждением для сыпучих материалов, разработанного компанией. Его в том числе актуально применять в стекольной промышленности.

Помимо непосредственно производственного оборудования, ряд докладов был посвящен оборудованию для транспортировки материалов, систем промышленной газоочистки, различным видам упаковки ССС.

Доклады, посвященные вопросам экологии и уменьшению количества парниковых газов, показали актуальность данного вопроса не только за рубежом, но и на территории РФ. Стремление компаний к сокращению прямых выбросов и переход на возобновляемые источники энергии, инвестирование в проекты, которые сокращают выбросы углекислого газа, а также ряд других мероприятий свидетельствуют о том, что производственные компании готовы нести коллективную ответственность.

Участие в конференции представителей иностранных компаний подтверждает, что строительный рынок РФ остается перспективным для экономических взаимоотношений.

На основании представленной информации можно сделать вывод, что в настоящее время рынок сухих строительных смесей достаточно стабилен. Сохраняющийся высокий платежеспособный спрос на продукцию позволяет производителям адаптироваться к изменившимся условиям, находить варианты замещения импортных составляющих, внедряя импортозамещение в производственные процессы. Поставщики оборудования, сырья и другой продукции тщательно работают над вопросами логистики, сдерживания цен, внедрения новых цепочек сбыта. Есть основание надеяться, что подотрасль сухих строительных смесей адаптируется к изменившемуся из-за санкций социально-экономическим условиям с наименьшими потерями для сектора реального производства.





Технический тур был организован на производственную площадку ООО «Цементные технологии» (г. Стерлитамак) – российское научно-производственное предприятие, специализирующееся на разработках и производстве тампонажных материалов с улучшенными технологическими свойствами, а также инженерном сопровождении цементирования скважин.

Коллеги провели экскурсию по предприятию, продемонстрировали производственную линию, рассказали об особенностях производства, ответили на интересующие вопросы.



Шульган-Таш (Капова) пещера наиболее известна благодаря наскальным рисункам первобытного человека эпохи палеолита.

Существует две версии происхождения названия «Капова». Первая – от звука постоянной капли внутри и вторая – от слова «капище» (храм), поскольку есть свидетельства, что в доисторические времена пещера использовалась как храм (для этой же цели были сделаны наскальные рисунки).

Название Шульган-Таш происходит от башкирского «таш» – в переводе камень и «шульган» – это река, впадающая в р. Белую рядом со входом в пещеру.

Первое описание пещеры составил географ П.И. Рычков в 1760 г., изобразивший в своей работе подземные залы, гrotты, галереи и натечные образования. В 1959 г. работник заповедника, зоолог А.В. Рюмин обнаружил в Каповой пещере изображения животных, созданные между 12 и 10-м тыс. до н. э. До этого открытия считалось, что рисунки такого рода эпохи палеолита – феномен, который можно наблюдать только в определенных регионах на территории Франции и Испании (пещеры Ляско, Шабо, Альтамира и др.). В пещере Шульган-Таш было найдено порядка двухсот изображений и реликтовых пятен. Древние люди оставили в основном рисунки мамонтов, бизонов, лошадей и других животных, а также изображения хижин и разных геометрических фигур. Изображения выполнены в реалистичной манере при помощи красной охры.

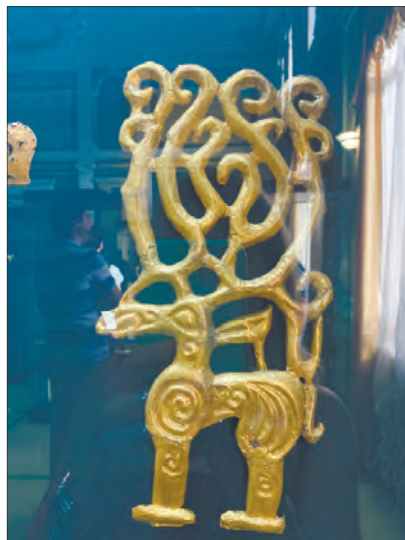
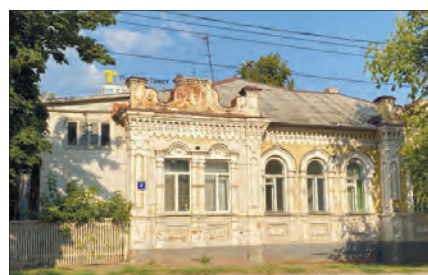
Общая протяженность пещеры около трех километров, галереи и залы расположены на трех уровнях. Для посещения открыты не все залы, и представленные вниманию туристов рисунки – это точные копии оригинальных наскальных рисунков, выполненные, чтобы сохранить уникальные росписи в целостности.





Помимо деловой программы, большое внимание организаторы традиционно уделити неформальному общению.

Участники конференции познакомились с колоритом Башкортостана – посетили обзорную экскурсию по г. Уфе; увидели коллекцию золота сарматов в Музее археологии и этнографии Института этнологических исследований имени Р.Г. Кузеева Уфимского научного центра РАН, послушали курай, попробовали кумыс и съездили в уникальный государственный природный биосферный заповедник «Шульган-Таш» на Южном Урале, археологический памятник мирового значения – самую известную пещеру Урала Шульган-Таш (Капову).



Музей археологии и этнографии Института этнологических исследований им. Р.Г. Кузеева Уфимского научного центра РАН располагается в доме Е.А. Поносовой-Молло, памятнике каменной архитектуры начала XX в., который сам по себе произведение искусства. Уникальность музея в том, что по праву сердцем его нужно считать невероятной красоты коллекцию «Золото сарматов». Это уникальные золотые изделия Филипповских курганов IV–V вв. до н. э., расположенных в Оренбургской области. По своему историко-культурному значению сарматское золото является бесценным достоянием и не имеет аналогов в мире. Коллекция раскопана экспедицией под руководством известного башкирского археолога А.Х. Пшеничникова в 1987–1988 гг. Совместно с Эрмитажем в 2001–2003 гг. была организована выездная выставка «Золотые олени Евразии», которая демонстрировалась в США, Германии, Италии и Санкт-Петербурге, а затем вернулась в Уфу.

В коллекции 26 фигурок, вырезанных из дерева и обшитых золотыми пластинами. Олени двух видов: плоские и объемные. Скульптурки отличаются пропорциями и качеством отделки. Одинаковых среди них нет. На туловищах изображены завитки и линии, придающие выразительность очертаниям животного.

Т.А. Абакумова

Фото: М.А. Новоселецкая, ООО «КВИНТЕТ», автор

УДК 666.96

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-15-17>

Е.Н. БОТКА, генеральный директор (post@promstroyinform.ru)

Компания «Строительная информация» (191040, г. Санкт-Петербург, Лиговский пр., 73, оф. 320)

Рынок сухих строительных смесей России: итоги полугодия

Рассмотрены итоги работы отрасли сухих строительных смесей в первом полугодии 2022 г. Рынок модифицированных смесей России, несмотря на трудности, сохранил прирост на уровне 2%. После прироста на 12% в первом квартале во втором отмечено сокращение рынка на 4%. В первом полугодии заметно увеличился экспорт, а импорт сократился меньше, чем можно было бы ожидать. В целом по году ожидается умеренное сокращение рынка на 4–6%. Сформулированы варианты прогноза динамики рынка на 2022–2024 гг.

Ключевые слова: сухие строительные смеси, состояние отрасли, динамика рынка.

Для цитирования: Ботка Е.Н. Рынок сухих строительных смесей России: итоги полугодия // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 15–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-15-17>

E.N. BOTKA, General Director (post@promstroyinform.ru)

"Stroitel'naya Informatsiya" Co. (73, office 320, Ligovskiy Prospect, Saint-Petersburg, 191040, Russian Federation)

Dry Building Mixes Market in Russia: Half-Year Results

The results of the work of the industry of dry building mixes in the first half of 2022 are considered. The market of modified mixes in Russia, despite the difficulties, maintained an increase of 2%. After an increase of 12% in the first quarter, the market contracted by 4% in the second quarter. Exports increased markedly in the first half of the year, while imports declined less than might have been expected. In the whole year, a moderate reduction of the market by 4–6% is expected. Variants of the forecast of market dynamics for 2022–2024 are formulated.

Keywords: dry building mixes, state of the industry, market dynamics.

For citation: Botka E.N. Dry building mixes market in Russia: half-year results. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 15–17. (In Russian).

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-15-17>

В 2021 г. впервые за восемь лет рынок модифицированных сухих строительных смесей России показал двузначный прирост выпуска и потребления (+12% и +11% соответственно), было выпущено более 12 млн т этих материалов. В начале 2022 г. не было сомнений, что рост рынка продолжится. Первые два месяца года подтверждали эти прогнозы. Быстрое изменение произошло в конце февраля.

Уже в марте начались проблемы с импортным химическим сырьем. Поставки из Европы стали затруднены, освоение других каналов или переход на использование китайских аналогов потребовали времени. Сильно ослабевший в марте рубль также создавал проблемы. С другой стороны, несмотря на значительное (до 40% на отдельные наименования, более 20% в среднем) удорожание смесей, в марте спрос на них был ажиотажным. В итоге рынок закончил первый квартал с двузначным приростом по выпуску и потреблению (+12% в натуральных показателях к аналогичному кварталу 2021 г.).

Со второго квартала начались проблемы со спросом. Снижение реальных доходов населения, сберегательное поведение, почти полная недоступность кредитов вплоть до мая, неопределенность и проблемы у застройщиков серьезно притормозили рынок. У части компаний, в том числе крупнейших, динамика производства смесей ушла в минус с апреля, другим удалось сохранить положительные темпы до июня. Тем не менее спад в отрасли во втором квартале начался. Однако его глубина не была значитель-

ной (–4% как по выпуску, так и по потреблению). По мнению автора, в спад второго квартала внесли вклад проблемы как со спросом, так и с предложением смесей на фоне проблем с сырьем. Несмотря на спад продаж нового жилья, застройщики активно достраивали объекты. За полугодие прирост ввода нового многоквартирного жилья составил 21%, общий ввод жилья вырос на 44%. С учетом того, что СССР — прежде всего отделочные материалы, а отделка более-менее предшествует сдаче дома в эксплуатацию, «большая стройка» заметно поддержала спрос на смеси. Одновременно происходил заметный спад спроса на смеси в розничном/мелкооптовом сегменте.

Успехи первого квартала в совокупности с не слишком глубоким спадом во втором позволили рынку удержать положительную динамику по итогам полугодия (+2% в натуральном выражении). Виды смесей, где доля объектных поставок выше, в основном и обеспечили этот результат. Например, продажи цементных модифицированных штукатурок увеличились по итогам полугодия на 9%, гипсовых — на 2%. В то же время более «розничные» товарные группы (клеи для плитки, ровнители для пола, некоторые шпатлевки), напротив, ушли в отрицательные значения (рис. 1).

В разных регионах рынок смесей реагировал на кризис по-разному. В Московском регионе, некоторых областях ЦФО, Поволжье продажи сократились, тогда как рынки Санкт-Петербурга, Урала,

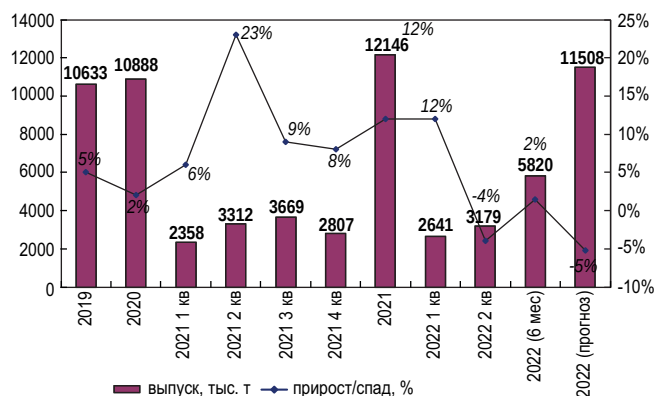


Рис. 1. Производство модифицированных ССС в России
Fig. 1. Production of modified dry mortar in Russia

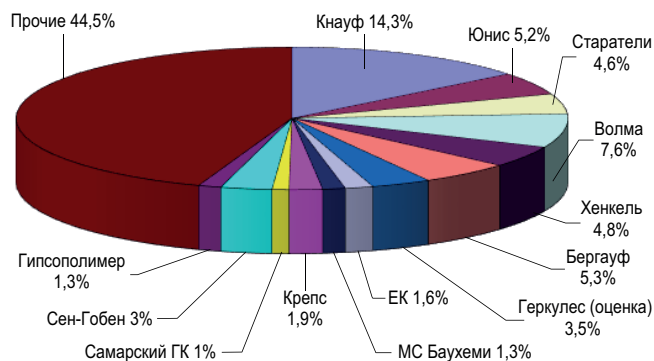


Рис. 2. Доли рынка модифицированных ССС России, 1-е полугодие 2022 г., %
Fig. 2. Market shares of modified dry mortars in Russia, 1st half of 2022, %

Таблица 1
Table 1

Импорт и экспорт модифицированных ССС
Import and export of modified dry mortars

	2017	2018	2019	2020	2021	2022 (1-е полугодие)	2022 (прогноз)
Ввоз ССС в Россию, тыс. т, всего	179	143	135	129	101	42	86
Прирост (спад), %	+40%	-20%	-6%	-4%	-21%	-3%	-14%
Экспорт ССС из России, тыс. т	136	142	153	182	251	127	226
Прирост (спад), %	0%	+4%	+7%	+19%	+38%	+8%	-10%

Сибири, Дальнего Востока и Юга (кроме Крыма) выросли.

Различалась и динамика выпуска (продаж) у отдельных компаний. Те, кто был ближе к «большой стройке», активно работал с объектами и при этом имел некоторое ценовое преимущество перед наиболее дорогими брендами, как правило, сохранял прирост. Чем больше компания была завязана на сетевую розницу, чем дороже были смеси, тем чаще такие фирмы демонстрировали спад. Хотя это правило не без исключений (рис. 2).

Интересной была динамика импорта и экспорта сухих смесей (табл. 1). Хотя и тот и другой невелики по сравнению с размером рынка (менее 1% и около 2% соответственно), для отдельных регионов (импорт) и компаний (экспорт) их значение более существенно. В последние годы импорт смесей оказывал сколько-нибудь заметное влияние на рынок в Калининградской области (поставки из Польши и Литвы) и на Юге (гипсовые смеси турецкого производства). Как и следовало ожидать, поставки в Калининград существенно сократились (-28% за полгода). А вот импорт из Турции после умеренного спада в начале года вернулся к росту в июне. Эта тенденция сохранилась и дальше. В целом с учетом как европейских санкций, так и крепкого рубля, стимулирующего импорт, по итогам года сокращение ввоза смесей может оказаться небольшим, на уровне 10–15%. Отметим, что ряд компаний с зарубежным капиталом прекратил ввоз тех смесей, кото-

рые ранее производились за рубежом. Производство некоторых из этих позиций было локализовано, другие исчезли с рынка.

Экспорт смесей очень сильно, на десятки процентов, вырос в начале года. В течение марта–мая темпы прироста последовательно снижались, в июне за рубежом было поставлено меньше смесей, чем за тот же месяц 2021 г.; в июле сокращение стало двукратным. За полугодие в целом экспортировано на 8% больше смесей, чем год назад. Однако ожидать положительной динамики по году в целом вряд ли возможно

Таблица 2
Table 2

Прогнозы объемов и динамики потребления
модифицированных ССС России, 2022–2024 гг.
Forecasts of volumes and dynamics of consumption
of modified dry mortars in Russia, 2022–2024

Показатели	2022	2023	2024
Оптимистический вариант прогноза			
Емкость рынка, тыс. т	11636	11869	12700
Динамика, %	-3%	+2%	+7%
Наиболее вероятный вариант прогноза			
Емкость рынка, тыс. т	11368	10800	10800
Динамика, %	-5%	-5%	0%
Пессимистический вариант прогноза			
Емкость рынка, тыс. т	11036	9933	9436
Динамика, %	-8%	-10%	-5%

вероятно, сокращение экспорта составит как минимум 10–15%. Санкции не играют здесь значительной роли, основная проблема экспортеров — сильный рубль.

В июле–августе спад производства и потребления смесей, по нашим предварительным оценкам, углубился. Как минимум часть компаний, сохранявших положительную динамику выпуска вплоть до июня, ушла в минус. Мы полагаем, что наиболее активный спрос на ССС со стороны крупных строительных компаний уже позади. Застройщики начиная с июня вводят в эксплуатацию меньше многоквартирных домов, чем за год до этого. Розничный сегмент сохраняет отрицательную динамику.

К середине года большинство компаний — производителей смесей в основном решили проблемы с поставками добавок. Однако некоторые сложности все же сохраняются. На очереди трудности с под-

держанием работы оборудования зарубежного производства, пик которых придется, вероятно, на 2023 г.

Третий квартал отрасль завершает с более глубоким спадом, чем второй (около -10%). Наиболее сложными в этом году могут оказаться последние три месяца, с октября по декабрь. Автор ожидает сокращение производства и потребления смесей на 13–15% к аналогичному периоду 2021 г. В итоге наиболее вероятный вариант прогноза на 2022 г. в целом — спад потребления модифицированных смесей в России на 5–6%. Предполагается, что спад примерно такой же глубины можно ожидать в 2023 г., а стабилизация рынка вероятна в 2024 г. Неопределенность в отношении дальнейшего развития ситуации в экономике в целом, в строительстве и на рынке ССС в частности, как никогда, велика. Не исключаются и другие варианты прогноза (табл. 2).

Конференция «Рынок отделочных и теплоизоляционных материалов 2022»

<http://www.bestresearch.ru/conference/conference.htm>

13–14 октября 2022 г.

Курортный р-н Санкт-Петербурга,
г. Зеленогорск, загородный клуб «Терийоки»

Конференция посвящена различным аспектам ситуации на рынках нескольких групп материалов. Основная задача мероприятия — предоставление участникам информации о рыночной ситуации и возможность обсудить ее с коллегами.

ТЕМАТИКА

- Рынок сухих строительных смесей России: предварительные итоги 2022 г. и краткосрочные перспективы. Среднесрочные тренды развития отрасли.
- Экспортные возможности промышленности строительных и отделочных материалов. Зарубежные рынки отделочных материалов.
- Состояние строительного комплекса России, рынка отделочных работ, последствия кризиса и перспективы.
- Системы теплоизоляции фасадов: рынок России в 2016–2022 гг., прогноз на ближайшие годы.
- Рынок теплоизоляционных материалов: современное состояние, перспективы различных материалов на ближайшие годы и среднесрочную перспективу.
- Производство и потребление гипса, листовых и плитных материалов на его основе. Развитие и проблемы гипсовой промышленности.
- Рынок лакокрасочных материалов России: вызовы, динамика, прогноз развития.
- Рынок гидроизоляционных материалов: состояние, игроки, тенденции.

Подать заявку на участие в конференции можно по ссылке:
<http://www.bestresearch.ru/conference/application2022.doc>

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

<http://www.bestresearch.ru/conference/programm2022.doc>

Организатор: Компания «Строительная информация»

За более подробной информацией обращаться:

тел./факс (812) 611-0126 (многоканальный)

e-mail: post@promstroyinform.ru

191040, г. Санкт-Петербург,

Лиговский пр., 73, оф. 320

УДК 693.5

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-18-24>

А.О. АДАМЦЕВИЧ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИИ СМиТ (AdamtsevichAO@mgsu.ru),
А.П. ПУСТОВГАР, канд. техн. наук, научный руководитель НИИ СМиТ (PustovgarAP@mgsu.ru)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)
(129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Аддитивное строительное производство: исследование эффекта анизотропии прочностных характеристик бетона

Аддитивное строительное производство или строительная 3D-печать бетоном является, с одной стороны, развитием существующих технологий укладки бетонной смеси в монолитном домостроении, а с другой – создает предпосылки перехода к принципиально новому уровню производительности труда в строительстве, основанному на автоматизированном выполнении строительных операций и сокращении доли ручного труда при одновременном снижении материалоемкости и повышении гибкости архитектурного и объемно-планировочного проектирования зданий и сооружений. Для сокращения барьеров на пути массового применения аддитивного строительного производства необходима разработка обоснованных подходов к проектированию и расчету зданий и сооружений, возводимых с применением этой технологии, на основе учета особенностей напечатанных бетонных конструкций и эмпирической оценки возможных отличий их эксплуатационных свойств от аналогичных конструкций, создаваемых при помощи традиционных технологий формовки в опалубку. В настоящей статье рассматриваются результаты этапа проводимой авторами научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы, направленной на получение экспериментальных данных для разработки рекомендаций по проектированию бетонных конструкций зданий и сооружений, возводимых с применением технологии аддитивного строительного производства, в части, касающейся исследования эффекта анизотропии некоторых прочностных характеристик бетонных изделий, изготовленных при помощи строительного 3D-принтера методом послойной экструзии с вертикальной шнековой подачей дисперсно-армированной бетонной смеси для аддитивного строительного производства.

Ключевые слова: аддитивное строительное производство, 3D-печать бетоном, 3DCP, прочность, дисперсное армирование, полимерная фибра, анизотропия свойств.

Работа выполнена в рамках государственного задания, утвержденного Минстроем России от 29.12.2021 № 069-00002-22-00. Экспериментальные исследования проводились с использованием приборной базы ГР ЦКП НИУ МГСУ.

Авторы выражают благодарность коллегам из подразделений НИИ СМиТ, НИИ ЭМ и НИИИЦ «МГСУ СТРОЙ-ТЕСТ»

Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, принявшим участие в подготовке и проведении испытаний.

Для цитирования: Адамцевич А.О., Пустовгар А.П. Аддитивное строительное производство: исследование эффекта анизотропии прочностных характеристик бетона // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 18–24.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-18-24>

A.O. ADAMTSEVICH, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Researcher, NII SM&T (Research Institute of Building Materials and Technologies) (AdamtsevichAO@mgsu.ru),

A.P. PUSTOVGAR, Candidate of Sciences (Engineering), Scientific Supervisor, NII SM&T (Research Institute of Building Materials and Technologies) (PustovgarAP@mgsu.ru)

Moscow State University of Civil Engineering (National Research) (NRU MGSU) (26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation)

Additive Manufacturing in Construction: the Research of the Anisotropy Concrete Strength Effect

On the one hand, additive manufacturing in construction or 3D concrete printing is the development of existing technologies for concrete pouring in monolithic housing construction, on the other, it creates the prerequisites for the transition to a fundamentally new level of labor productivity in construction, which is based on automated execution construction operations and a reduction in the share manual labor while reducing material consumption and increasing the flexibility of architectural and space-planning design of buildings and structures. To reduce barriers to the wide application of additive manufacturing in construction, it is necessary to develop reasonable approaches to the design and calculation of buildings and structures erected using this technology, based on the features of printed concrete structures and an empirical assessment of possible differences in their operational properties from similar ones created using traditional molding technologies. This article discusses the results of the research and development work stage carried out by the authors. The main aim of the research was to obtain an experimental data for the development of recommendations for the design of buildings concrete structures created using the technology of additive manufacturing in construction, in terms of studying the effect of anisotropy of some strength characteristics concrete products made using a construction 3D concrete printer by layer-by-layer extrusion with vertical screw feeding of a dispersion-reinforced concrete mix.

Keywords: additive manufacturing in construction, 3D concrete printing, 3DCP, strength, dispersed reinforcement, polymer fiber, anisotropy of characteristics.

The work was carried out within the framework of the state task approved by the Ministry of Construction of the Russian Federation No. 069-00002-22-00 dated 29.12.2021.

Experimental studies were carried out using the instrument base of the GR CCP of the NRU MGSU.

The authors express their gratitude to colleagues from the departments of the SMITH Research Institute, the EM Research Institute and the MGSU STROY-TEST Research Institute of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, who took part in the preparation and conduct of the tests.

For citation: Adamtsevich A.O., Pustovgar A.P. Additive manufacturing in construction: the research of the anisotropy concrete strength effect. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 18–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-18-24>

Аддитивное строительное производство, или строительная 3D-печать бетоном (3DCP – от *англ.* 3D Concrete Printing) на сегодняшний день является одним из наиболее востребованных и динамично развивающихся мировых трендов внедрения аддитивных технологий в строительную практику. Число новых научных публикаций, затрагивающих тему 3DCP и индексируемых международной реферативной базой научного цитирования Scopus, увеличивается в среднем на 70% ежегодно на протяжении последних десяти лет (рис. 1).

Развитие интереса к данной теме во многом обусловлено актуальностью проблемы отставания темпов роста производительности труда в строительстве от других отраслей экономики [1–4], что негативно отражается на потенциале общего экономического роста по причине ограничения возможностей бесконечного вовлечения дополнительных трудовых ресурсов в строительство для удовлетворения постоянно растущих потребностей человечества в новой промышленной и гражданской инфраструктуре.

На практике доказано, что при разумном подходе к выбору объектов, возводимых при помощи 3DCP, обеспечивается сокращение сроков и стоимости строительства, снижается материалоемкость и появляется возможность оптимизации объемно-планировочных решений возводимых объектов за счет повышения гибкости в выборе конструктивных форм при отсутствии ограничений, накладываемых использованием опалубки [5–10].

Согласно определению, закрепленному в ГОСТ Р 59095–2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Термины и определения», аддитивное строительное производство (АСП) представляет собой процесс возведения конструкций зданий и сооружений, основанный на создании изделий АСП по электронной геометрической модели путем добавления материала для АСП, как правило, слой за слоем. При этом к материалам для АСП относят бетонную или растворную смесь для АСП, что с точки зрения технологии производства строительного производства приближает аддитивное строительство к традиционному монолитному строительству, при котором для вертикальных конструкций также часто используется послойная укладка бетонной смеси отдельными ярусами.

Важное отличие аддитивного строительного производства от классической технологии укладки бетона в монолитном строительстве с точки зрения формирования конечных эксплуатационных свойств возводимых бетонных конструкций, помимо особенностей тепломассопереноса в тонком слое бетонной смеси, связано с отсутствием возможности исполь-

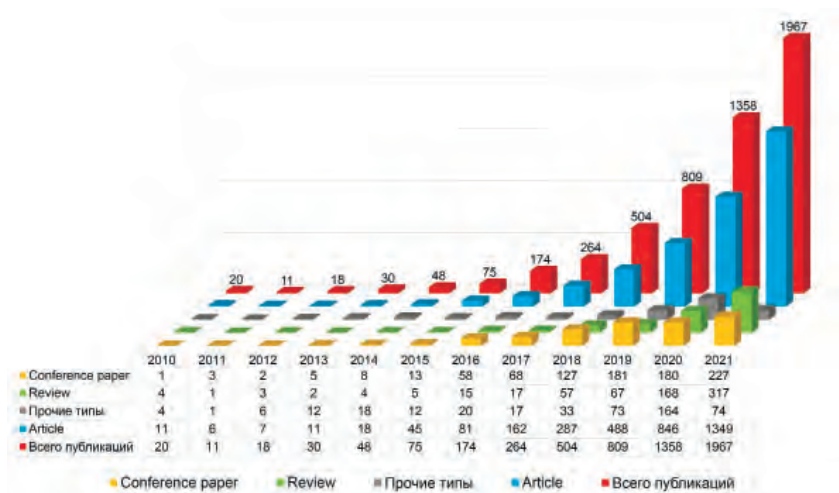


Рис. 1. Число ежегодных публикаций, связанных с тематикой 3D Concrete Printing и индексируемых международной базой Scopus

Fig. 1. Amount of publications annually published related to the subject of 3D Concrete Printing and indexed by the international Scopus database

зования традиционных способов уплотнения бетона в опалубке для придания материалу однородности [9, 11]. В результате этого возникает необходимость усиленного контроля межслойной адгезии бетонных конструкций, возводимых по технологии аддитивного строительного производства, а также потребность в более детальном исследовании эффекта анизотропии эксплуатационных свойств затвердевшего материала для АСП в целях учета этого эффекта при проектировании и расчете конструкций, выполняемых по технологии 3DCP.

Упоминание анизотропного эффекта, который выражается в вариативности физико-механических характеристик материала в случае приложения нагрузки вдоль, поперек либо перпендикулярно направлению печати слоя, есть в работах различных исследователей [12–18], однако фактический разброс значений исследуемых параметров для разных способов приложения нагрузки, фиксируемый разными авторами, зачастую существенно различается, что может свидетельствовать о нестабильном характере данного эффекта и его корреляции с особенностями выбранной технологии экструзии при выполнении строительной 3D-печати и с другими параметрами технологического процесса и/или используемого оборудования, а также материала для аддитивного строительного производства. В некоторых статьях отмечается также возможность получения более плотной структуры бетона при использовании технологии строительной 3D-печати по сравнению с традиционной технологией формовки бетонных изделий, что позволяет сделать вывод о целесообразности дальнейшего изучения этого вопроса.

Постановка эксперимента по исследованию анизотропии прочностных свойств

На базе Научно-исследовательского института строительных материалов и технологий (НИИ СМиТ) НИУ МГСУ реализуется программа



Рис. 2. Процесс печати изделия
Fig. 2. Product printing process



Рис. 3. Обрезка краев изделия в местах скругления печатного слоя после завершения печати
Fig. 3. Trimming the edges of the product in the places of rounding of the printed layer after printing is completed

экспериментальных исследований, направленная на развитие научно-технических основ применения аддитивного строительного производства, обеспечивающего сокращение сроков и стоимости возведения монолитного каркаса зданий и сооружений, в рамках которой, помимо прочего, проведено экспериментальное изучение эффекта анизотропии физико-механических характеристик образцов бетона, выбуренных из сплошных многослойных бетонных изделий, изготовленных по технологии аддитивного строительного производства, а также сравнение полученных результатов с аналогичными характеристиками контрольного бетонного изделия, изготовленного из того же материала, но с применением традиционной технологии формовки.

Для проведения исследования был разработан базовый состав материала для аддитивного строительного производства, представляющий собой модифицированную мелкозернистую сухую строительную смесь на основе цементного вяжущего и заполнителей различных фракций с максимальной крупностью до 2,5 мм. В составе применялась технология дисперсного армирования полимерными волокнами. Подвижная смесь для изготовления всех бетонных изделий готовилась при идентичных значениях водотвердого отношения ($V/T=0,15$).

Контрольное изделие было изготовлено путем укладки бетонной смеси в фанерную опалубку, внутренние поверхности которой покрывались тонким слоем смазки, не оставляющей пятен на поверхности образцов и не влияющей на свойства поверхностного слоя бетона. Уплотнение бетонной смеси при формовке выполнялось вручную с применением штыковки. Опалубка заполнялась строительной смесью слоями высотой не более 100 мм. Каждый слой уплотнялся штыкованием стальным стержнем диаметром 16 мм с закругленным концом. Число нажимов стержня рассчитывалось из условия, чтобы один нажим приходился на 10 см верхней открытой поверхности образца. Штыкование проводилось равномерно по спирали от краев формы к ее середине. После окончания укладки и уплотнения смеси в опалубке верхняя поверхность контрольного изделия заглаживалась мастерком.

Изготовление образцов по технологии аддитивного строительного производства осуществлялось при помощи портального строительного 3D-принтера «АМТ» S-6045M при следующих параметрах печати (рис. 2):

- тип подачи материала для АСП — шнековый;
- высота печатного слоя — 1 см;
- ширина печатного слоя — 5 см;
- скорость подачи смеси подбиралась с учетом исключения разрывов слоя и недопущения наплывов бетонной смеси по краям печатного слоя и изделия.

В связи с тем, что процесс печати изделия прямоугольной формы шириной, соответствующей ширине нескольких печатных слоев, предполагал многократный разворот печатающей головки принтера, сразу после завершения печати изделия его края обрезались для обеспечения чистоты эксперимента при изучении влияния анизотропии свойств за счет исключения из работы испытуемых образцов тех участков, в которых происходило изменение направления печатного слоя (рис. 3).

Для изучения анизотропии свойств из изготовленных изделий габаритами не менее $300 \times 300 \times 300$ мм

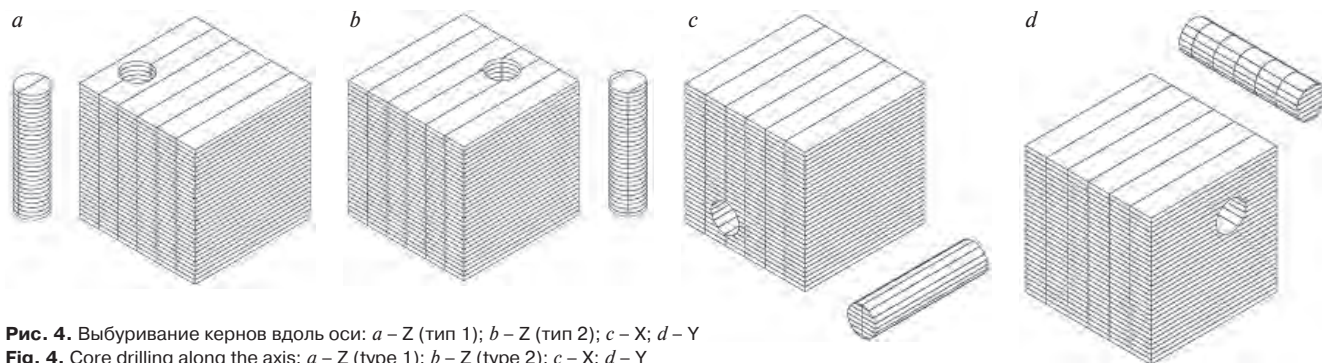


Рис. 4. Выбуривание кернов вдоль оси: а – Z (тип 1); б – Z (тип 2); в – X; д – Y
Fig. 4. Core drilling along the axis: a – Z (type 1); b – Z (type 2); c – X; d – Y

выбуривались образцы-kerne диаметром 73 мм и длиной около 300 мм. Выбуривание кернов из напечатанных изделий выполнялось в разных направлениях к оси печати согласно схемам на рис. 4.

Выбуренные керны распиливались на отдельные образцы и торцевались для обеспечения возможности проведения стандартных испытаний по определению искомых характеристик бетона. На текущем этапе выполнения работы исследовались характеристики прочности при сжатии и прочности на растяжение при раскалывании бетона по ГОСТ 28570–2019 «Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций». Прочность при сжатии определялась на сериях, состоящих не менее чем из шести образцов, а прочность на растяжение при раскалывании – на сериях из четырех образцов с отношением длины образца к диаметру $h/d=1$.

В дополнение к механическим испытаниям каждый образец подвергался сквозному ультразвуковому прозвучиванию прибором ПУЛЬСАР-2.1 с учетом требований ГОСТ 17624–2012 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности». Также для всех образцов проводилось измерение основных физических характеристик и рассчитывалась их средняя плотность.

Результаты испытаний

На рис. 5. представлены результаты определения плотности и скорости распространения ультразвука при сквозном прозвучивании для всех единичных образцов, участвующих в исследовании.

Результаты испытаний по определению прочностных характеристик отдельных образцов представлены на рис. 6. Визуализация этих результатов с привязкой к плотности каждого образца представлена на рис. 7.

На основе полученных результатов оценки прочности при сжатии и на растяжение при раскалывании рассчитаны отношения обоих параметров по принципу «каждый к каждому» для всех испытанных образцов. Визуализация полученных данных представлена на рис. 8.

Сводные результаты усредненных значений в сериях по итогам проведенных экспериментальных исследований представлены в таблице. Полученные данные отражают средние арифметические значения испытаний по сериям без применения отбраковки выпадающих единичных значений.

Обсуждение результатов

Результаты реализованного этапа исследования для выбранного материала и способа изготовле-

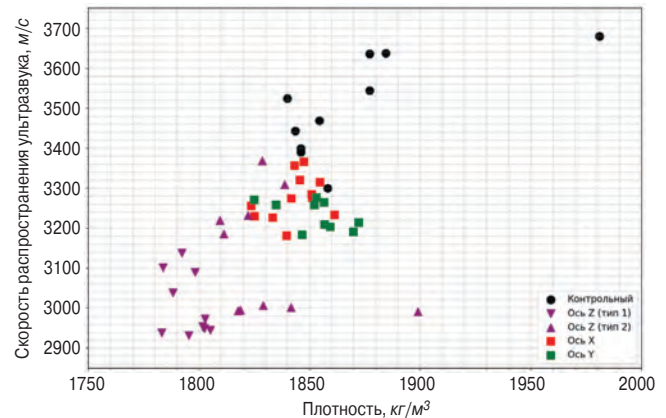


Рис. 5. Зависимость скорости распространения ультразвука от плотности исследуемых образцов

Fig. 5. Dependence of the ultrasound propagation velocity on the density of the samples under study

ния образцов, в том числе методом аддитивного строительного производства, позволили отметить следующее.

- Средняя плотность образцов, отобранных из изделий, изготовленных по технологии аддитивного строительного производства, оказалась в среднем ниже плотности образцов, отобранных из изделий, которые были изготовлены по традиционной технологии формовки в опалубку. Для отдельных образцов в серии разница является критичной, что в целом соответствует предположению о менее эффективном уплотнении бетонной смеси при вертикальной экструзии в процессе строительной 3D-печати по сравнению с классической технологией, используемой в монолитном строительстве. Данное наблюдение хорошо коррелирует с результатами сквозного ультра-

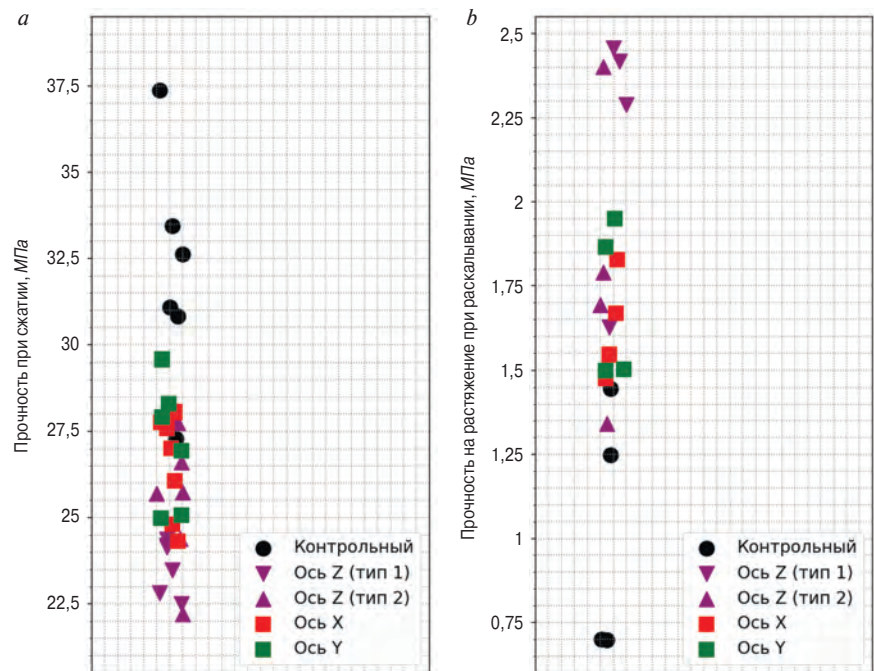


Рис. 6. Единичные значения прочности образцов: а – при сжатии; б – на растяжение при раскалывании

Fig. 6. Single values of specimen strength: a – in compression; b – for tension when splitting

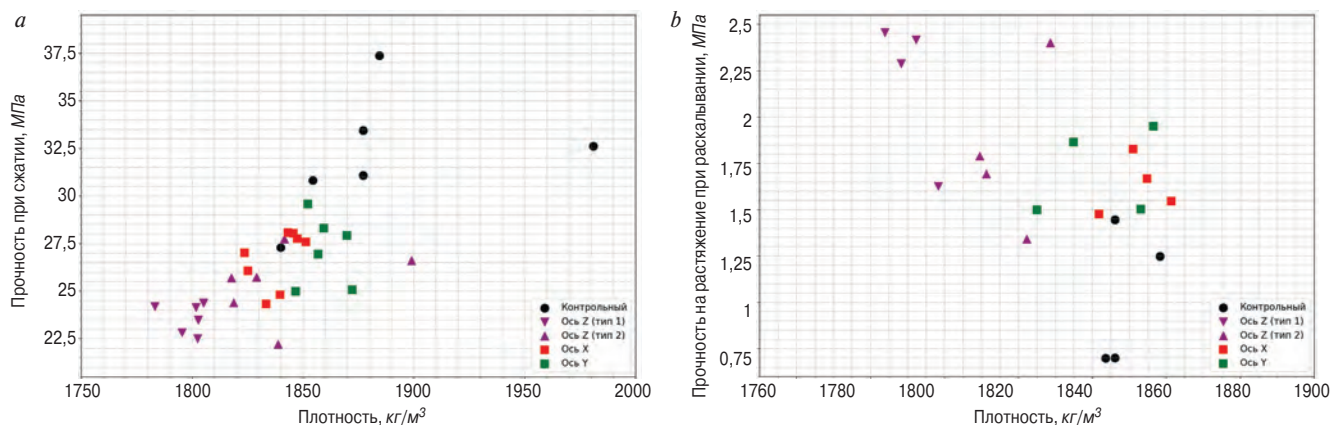


Рис. 7. Зависимость прочности при сжатии (а) и на растяжение при раскалывании (б) от плотности образцов
Fig. 7. Dependence of the compressive strength (a) and tensile strength upon splitting (b) on the density of the samples

Сводная таблица средних значений по результатам испытаний
Summary table of average values from test results

Маркировка	Средние значения характеристик по сериям				
	Плотность, кг/м³	Скорость распространения ультразвука	Прочность при сжатии, МПа	Прочность на растяжение при раскалывании, МПа	Прочность на растяжение при раскалывании от сжатия, %
Контрольный	1867	3581,8	32,1	1,02	3,22
Ось Z (тип 1)	1794,6	2948,5	23,6	2,2	9,33
Ось Z (тип 2)	1829,3	3049,7	25,4	1,81	7,15
Ось X	1845,4	3276,2	26,7	1,63	6,12
Ось Y	1850,9	3209,7	27,1	1,7	6,31

звукового прозвучивания исследуемых образцов (рис. 5). В то же время следует отметить более существенную дисперсию результатов оценки плотности образцов, изготовленных методом формовки, по сравнению с печатными образцами. Этот эффект требует дополнительного изучения и может быть связан с более равномерным перемешиванием материала при шнековой прокатке и особенностями воздухововлечения бетонной смеси в процессе экструзии.

- Средняя прочность при сжатии образцов бетона, выбуренных из напечатанных при помощи строительного 3D-принтера изделий во всех трех осях координат, оказалась в среднем на 15–27% ниже средней прочности при сжатии аналогичных образцов, отобранных из конструкций, изготовленных по традиционной технологии формования с уплотнением бетонной смеси (рис. 7, а). Данное наблюдение также хорошо коррелируется с результатами оценки плотности и ультразвукового обследования образцов всех типов.

- Средняя прочность на растяжение при раскалывании образцов бетона, отобранных из напечатанных при помощи строительного 3D-принтера изделий во

всех трех осях координат, оказалась выше средней прочности на растяжение при раскалывании аналогичных образцов, выбуренных из конструкции, изготовленной по традиционной технологии формования с уплотнением (рис. 6, б; 7, б). При этом средняя прочность на растяжение при раскалывании для серий образцов, выбуренных в направлении оси Z, оказалась фактически вдвое выше аналогичного параметра для серии контрольных образцов.

- Различные способы выбуривания образцов вдоль оси Z по границе соседних слоев (тип 1) и по центру слоя (тип 2) практически не отразились на результатах проведенных испытаний, что может свидетельствовать о получении достаточно однородного бетонного массива, несмотря на печать изделий требуемой ширины, соответствующей ширине шести вертикальных слоев.

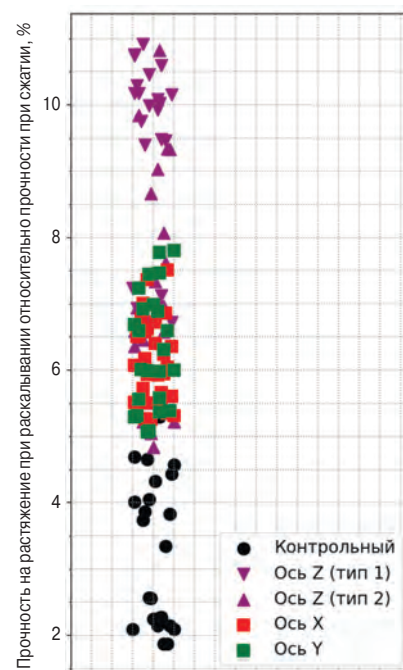


Рис. 8. Комбинации отношений прочности на растяжение при раскалывании и прочности при сжатии для всех исследованных образцов

Fig. 8. Combinations of ratios of tensile strength in splitting and compressive strength for all studied samples

• Несмотря на отличия физико-механических характеристик образцов, отобранных из напечатанных изделий, от контрольных образцов, анизотропия исследуемых прочностных характеристик бетона изделий, изготовленных по технологии аддитивного строительного производства, хоть и проявилась, но оказалась не столь критичной в рамках проведенных экспериментов. Среднеквадратичное отклонение усредненных результатов по сериям образцов, отобранных в разных направлениях из напечатанных изделий (см. таблицу), составило чуть более 6% для прочности при сжатии и порядка 14% для прочности на растяжение при раскалывании.

• По результатам проведенных испытаний зафиксирован существенный прирост отношения прочности на растяжение при раскалывании к прочности при сжатии для всех образцов, изготовленных по технологии аддитивного строительного производства, в сравнении с образцами, изготовленными традиционным способом формования (рис. 8). При этом наибольший положительный эффект достигнут по направлению вертикальной оси Z, что может иметь определенную практическую ценность. Вероятно, данный эффект может быть связан с более однородной пространственной ориентацией волокон дисперсного армирования при прохождении бетонной смеси через экструдер печатающей головки строительного 3D-принтера по сравнению с хаотичным расположением полимерной фибры в толще бетона при классической формовке. Однако полученный результат также требует более детального изучения.

Заключение

Строительную 3D-печать бетоном с точки зрения результатов выполнения основного производственного процесса сложно отнести к принципиально новым технологиям строительства, так как она скорее является более продвинутым и перспективным способом автоматизированной укладки бетонной смеси. Такая особенность делает возможным при расчете возводимых конструкций зданий и сооружений применять значительную часть существующих принципов и подходов, используемых при расчете традиционных бетонных и железобетонных конструкций в монолитном строительстве. Однако практическая реализация данного тезиса требует эмпирической проверки особенностей и различий физико-механических характеристик бетонных изделий и конструкций, изготовленных различными методами, в целях уточнения при необходимости расчетных коэффициентов, которые должны применяться для проектирования надежных и безопасных зданий и сооружений, возводимых частично или полностью с применением технологии аддитивного строительного производства.

Проведенное исследование, помимо некоторой анизотропии прочностных характеристик, наглядно показало наличие ряда других особенностей

формирования свойств бетонных конструкций, выполненных по технологии аддитивного строительного производства методом послойной экструзии с вертикальной подачей бетонной смеси, по сравнению с традиционной технологией формования в опалубку.

В рамках дальнейших исследований планируется экспериментальная оценка влияния эффекта анизотропии и особенностей многослойной структуры 3D-печатного массива на прочность бетона при осевом растяжении, а также на деформационные свойства бетона в конструкциях. Развитие выполняемых исследований предполагает также изучение влияния на стабильность физико-механических характеристик бетона вариативных параметров технологии строительной 3D-печати, таких как изменение толщины и высоты печатного слоя, использование альтернативных способов экструзии и др.

Список литературы / References

1. Reinventing Construction: a route to higher productivity. McKinsey Global Institute analysis. 2017.
2. Nasir H., Ahmed H., Haas C., Goodrum P.M. An analysis of construction productivity differences between Canada and the United States. *Construction Management and Economics*. 2013, pp. 595–607, 2013. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.848995>
3. Mischke J. Reinventing construction: a route to higher productivity. McKinsey Global Institute. Construction: Let's build changes! 2017.
4. Naoum S. Factors influencing labor productivity on construction sites. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2016. Vol. 65 (3), pp. 401–421. DOI: 10.1108/IJPPM-03-2015-0045
5. Yiwei Weng, Mingyang Li, Shaoqin Ruan, Teck Neng Wong, Ming Jen Tan, Kah Leong Ow Yeong, Shunzhi Qian. Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 261. 121245. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121245>
6. Abhinav Bhardwaj, Scott Z. Jones, Negar Kalantar, Zhijian Pei, John Vickers, Timothy Wangler, Pablo Zavattieri, Na Zou. Additive manufacturing processes for infrastructure construction: a review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2019. Vol. 141 (9). 091010 (13 pages). <https://doi.org/10.1115/1.4044106>
7. Paolini A., Kollmannsberger S., Rank E. Additive manufacturing in construction: a review on processes, applications, and digital planning methods. *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 30. 100894. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>
8. Panda B., Tay Y.W.D., Paul S.C., Tan M.J. Current challenges and future potential of 3D concrete printing: aktuelle Herausforderungen und Zukunftspotenziale des 3D-Druckens bei Beton. *Materialwissenschaft und*

- Werkstofftechnik*. 2018. Vol. 49 (5), pp. 666–673. DOI: 10.1002/mawe.201700279
9. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112, pp. 37–49. 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
 10. Wangler T., Roussel N., Bos F.P., T.A.M. Salet, R.J. Flatt, «Digital concrete: a review». *Cem. Concr. Res.*, 123(2019), p. 105780, 10.1016/j.cemconres.2019.105780.
 11. Shaodan Hou, Zhenhua Duan, Jianzhuang Xiao, Jun Ye. A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 273. 10.1016/j.conbuildmat.2020.121745
 12. Panda B., Chandra Paul S., Jen Tan M. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters*. 2017. Vol. 209, pp. 146–149.
 13. Guowei Ma, Zhijian Li, Li Wang. Fang Wang, Jay Sanjayan. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 202, pp. 770–783. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008>
 14. Hambach M., Volkmer D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. *Cement and Concrete Composites*. 2017. Vol. 79, pp. 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001>
 15. Feng P., Meng X., Chen J., Ye L. Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 93, pp. 486–497. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132>
 16. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 119, pp. 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>
 17. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42. Iss. 3, pp. 558–566. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>
 18. Viktor Mechtcherine, Kim van Tittelboom, Ali Kazemian, Eric Kreiger, Behzad Nematollahi, Venkatesh Naidu Nerella, Manu Santhanam, Geert de Schutter, Gideon Van Zijl, Dirk Lowke, Egor Ivaniuk, Markus Taubert, Freek Bos. A roadmap for quality control of hardening and hardened printed concrete». *Cement and Concrete Research*. 2022. Vol. 157. 106800. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106800>



**СТРОИТЕЛЬНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ**

КОНКУРС НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ СТАТЕЙ



РОССИЙСКАЯ
ГИПСОВАЯ
АССОЦИАЦИЯ

Технологическая безопасность гипсовой отрасли:

результаты научных исследований

развитие технологии и оборудования

применение гипсовых материалов в строительстве



Редакция научно-технического журнала «Строительные материалы» и Российская гипсовая ассоциация объявляют конкурс научных и научно-практических статей по гипсовой тематике.

В конкурсе принимают участие статьи, опубликованные в течение года с № 8-2022 г. по № 8-2023 г. по темам:

- Результаты научных исследований в области создания новых и оптимизации существующих гипсовых материалов
- Развитие технологии производства гипсовых материалов и изделий
- Техногенные гипсовые отходы и возможность их вовлечения в производство
- Применение гипсовых материалов в строительстве

Объявление итогов конкурса и награждение победителей состоится в рамках 11-й Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий»

К участию в конкурсе приглашаются:
магистранты, аспиранты, докторанты, соискатели ученой степени кандидата и доктора наук, сотрудники производственных предприятий и научно-производственные коллективы.

Рукописи статей необходимо представлять в редакцию в соответствии с техническими требованиями (см. раздел «Авторам» на сайте журнала <https://journal-cm.ru/index.php/ru/avtoram>) с пометкой «На конкурс статей по гипсу».

Крайний срок подачи конкурсных статей 1 июля 2023 г.

Конкурсная комиссия определяет лучшие статьи и объявляет победителей конкурса.

Победители конкурса награждаются ценными подарками, годовой подпиской на журнал «Строительные материалы» на 2024 г. и дипломами лауреата.

Авторам всех конкурсных статей вручаются дипломы участников конкурса.



www.rifsm.ru www.journal-cm.ru www.rosgips.ru

(499) 976-20-36, 976-22-08



«Экологические технологии переработки отходов с получением новых материалов и энергоносителей» — II Всероссийская молодежная научная школа в Тверском государственном техническом университете

"Ecological Technologies for Waste Processing with the Production of New Materials and Energy Carriers" — II All-Russian Youth Scientific School at Tver State Technical University

8–9 сентября 2022 г. в Тверском государственном техническом университете состоялась II Всероссийская молодежная научная школа «Экологические технологии переработки отходов с получением новых материалов и энергоносителей». Открывая конференцию, **М.Г. Сульман**, д-р хим. наук, заведующий кафедрой биотехнологии, химии и стандартизации Тверского государственного технического университета, отметил, что молодежная научная школа проводится в рамках проекта РНФ № 21-79-30004 «Разработка научных основ технологии полной комплексной переработки золошлаковых отходов угольных электростанций с получением ценных продуктов, востребованных в различных отраслях промышленности», однако ее тематика шире и включает вопросы переработки отходов металлургии, ТКО, принципов «зеленой» энергетики и строительства.

По мнению **А.А. Артемьева**, проректора по научной и инновационной деятельности, д-ра экон. наук, декана инженерно-строительного факультета ТвГТУ, формат научной школы эффективен благодаря высокому уровню докладчиков и широкому тематическому охвату.

Основными целями научной школы являются содействие широкому вовлечению молодежи в инновационную и научно-практическую деятельность; популяризация научно-технических достижений в области создания экологических технологий среди студентов и аспирантов вузов; обмен научными идеями и достижениями в области переработки отходов с получением новых материалов и энергоносителей; общение с ведущими учеными и специалистами в области создания экологических технологий переработки отходов.

Индустриальным партнером проекта стало ООО «ЭКОМАШГРУПП» (Тверь).

С базовым докладом «Изменение климата и энергетика» выступил академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор **С.В. Алексеев** (Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН). Он отметил, что энергетика — базис экономики любой страны. И в настоящее время возникла необходимость безотлагательно принимать принципиальные решения по дальнейшему развитию мировой энергетики, так как энергетика на органическом топливе объявлена основным источником антропогенной эмиссии углекислого газа, одной из главных причин глобального потепления климата. В связи с этим к 2050 г. почти 90% энергии должно производиться из возобновляемых источников.

Популярные цели в структуре энергетики — увеличение использования солнечной, ветровой и гидроэнергии, а также использования биотоплива за счет снижения углеводородного сырья и атомной энергии. Однако, как показывают углубленные научные исследования и масштабное многофакторное моделирование, не все так просто и однозначно. Ведь на изменение климата кроме парникового эффекта влияют такие факторы, как тропосферные аэрозоли, вулканическая деятельность, солнечная активность, параметры орбиты Земли. И все эти факторы взаимосвязаны.

Как известно, основной вклад в парниковый эффект принадлежит водяному пару (от 36 до 72%); доля диоксида углерода составляет 9–26%; метана — 4–9%; озона — 3–7%. При этом за счет сжигания органического топлива концентрация CO_2 в атмосфере возросла с 1850 г. по настоящее время на 48%. А модель баланса потоков CO_2 показывает, что дисбаланс в последние годы составляет не менее +4 млрд т CO_2 .

По оценке МГЭИК (IPCC) — Межправительственной группы экспертов по изменению климата, учрежденной программой ООН и Всемирной метеорологической организацией в 1988 г., дисбаланс энергии (поглощение Земли) составляет порядка 2,72 Вт/м².

Важным фактором, оказывающим влияние на климат, являются океанические течения.

МГЭИК разработаны два сценария выбросов CO_2 и их влияния на глобальную температуру поверхности Земли — с низким выбросом SSP1-2.6, с высоким выбросом SSP3-7.0. В сценарии SSP1-2.6 выбросы CO_2 начинают снижаться в 2020 г. до нуля к концу века, в то время как в сценарии SSP3-7.0 выбросы продолжают увеличиваться на протяжении всего XXI в. Различия двух сценариев начнут проявляться через 5–10 лет для концентрации CO_2 в атмосфере и через 20–30 лет — для температуры Земли. При этом следует учитывать, что если произойдет крупное извержение вулкана (что ожидается в ближайшие 100 лет) или крупная техногенная катастрофа (например, повреждение газопроводов «Северных потоков»), то возникнут сильные возмущения температуры, что еще более затруднит анализ климатических изменений.

Что же делать прямо сейчас для снижения нагрузки на окружающую среду и улучшение экологии на уровне региона, области, страны?

Например, можно разрабатывать и реализовывать различные способы энергетической утилизации свалочного газа (**А.Т. Тарасенко**, Объединенный институт высоких температур РАН), использовать различные источники альтернативной энергии (**Ю.Ю. Косивцов**, ТвГТУ).

Потенциал использования многотоннажных отходов в промышленности строительных материалов уникален. В докладах **С.В. Самченко** (МГСУ), **Е.В. Ткач** (МАРХИ), **И.К. Доманской** (УрФУ, Екатеринбург), **К.С. Петропавловского** (ТвГТУ) были представлены исследования, внедрение которых позволит утилизировать золы ТЭС, отходы пирометаллургической промышленности, микрокремнезем — отход производства кремния и ферросилиция, техногенных пенонаполнителей для производства бетонов различного назначения, гипсовых материалов, закладочных смесей.

Следует отметить, что живое общение со старшими коллегами из разных регионов, учеными академических институтов существенно расширяет научный кругозор молодых ученых, которые представили свои исследования на стендовой сессии.

Пожелаем молодежной научной школе дальнейшего развития и продолжения работы за рамками гранта.



Р.З. РАХИМОВ, д-р техн. наук, профессор, член-корр. РААСН

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1)

Экология, металлургия, минеральные вяжущие вещества и промышленность строительных материалов

Загрязнение окружающей среды отходами производства и потребления является негативным результатом и одной из важнейших проблем настоящей и будущей деятельности человечества. Эта проблема последней половины прошлого столетия привела к пересмотру стратегии развития, в основу которой заложены принципы ресурсосбережения и охраны окружающей среды, ставшие основой национальных программ многих стран. С 2019 г. в России реализуется национальный проект «Экология». Одним из основных источников загрязнения окружающей среды является металлургическая промышленность, шлаки и шламы которой применяются в производстве и модификации минеральных вяжущих веществ. Повышение объемов использования при этом отходов промышленности – одно из направлений решения экологической проблемы и развития промышленности строительных материалов.

Ключевые слова: экология, металлургия, промышленные отходы, металлургические шлаки, шламы, вяжущие вещества, цемент добавочный, шлакощелочное вяжущее, промышленность строительных материалов, национальный проект «Экология».

Для цитирования: Рахимов Р.З. Экология, металлургия, минеральные вяжущие вещества и промышленность строительных материалов // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 26–31. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-26-31>

R.Z. RAKHIMOV, Doctor of Sciences (Engineering), Corresponding Member of RAACS

Kazan State University of Architecture and Engineering (1, Zelenaya Street, Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation)

Ecology, Metallurgy, Mineral Binders and Building Materials Industry

Environmental pollution by production and consumption waste is a negative result and one of the most important problems of the present and future activities of mankind. This problem in the last half of the last century led to a revision of the development strategy, which is based on the principles of resource saving and environmental protection, which have become the basis of the national programs of many countries. Since 2019, the national project "Ecology" has been implemented in Russia. One of the main sources of environmental pollution is the metallurgical industry, slags and slurries of which are used in the production and modification of mineral binders. Increasing the use of industrial waste at the same time is one of the directions for solving the environmental problem and developing the building materials industry.

Keywords: ecology, metallurgy, industrial waste, metallurgical slags, sludges, binders, cement additive, slag-alkali binder, building materials industry, national project "Ecology".

For citation: Rakhimov R.Z. Ecology, metallurgy, mineral binders and building materials industry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 26–31. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-26-31>

Столетиями человеческая деятельность была направлена на непрерывное увеличение производства различной продукции и изъятие природных ресурсов и сопровождалась загрязнением окружающей среды техногенными продуктами, приведшим к мировым экологическим проблемам, среди которых:

- глобальное потепление климата, сопровождающееся увеличением числа разрушительных природных катаклизмов;
- увеличение смогов над крупными городами с 50% мирового населения;
- ослабление озонового слоя и увеличение потока ультрафиолетовых лучей на поверхность Земли;
- ежегодный слив в водный бассейн промышленных и бытовых стоков, приводящий к загрязнению около 70% рек и 20% поверхности Мирового океана;
- ежегодное изъятие из недр Земли более 4,2 млрд т горных пород с образованием 97–99% отходов их добычи и переработки;
- ежегодное образование отходов промышленности и потребление в объеме более 5 млрд т;
- ежегодный выброс в атмосферу около 150 млн т отходов твердых веществ;

– годовой ущерб от загрязнения окружающей среды отходами производства и потребления составляет 10% мирового ВВП;

– рост эпидемических заболеваний населения.

Дальнейшее накопление отходов промышленности и ТКО на свалках, в отвалах и хранилищах, в водном бассейне и атмосфере имеет губительные последствия как в отдельных странах, так и в целом на земном шаре.

С одной стороны, отходы являются тяжким бременем для существования жизни на Земле, а с другой – они являются ценным ресурсом, если ими распорядиться по-хозяйски. По прогнозу группы экспертов ООН во главе с лауреатом Нобелевской премии В.В. Леонтьевым, уже в первой половине XXI в. до 55% потребностей в природном сырье будет восполняться промышленными отходами [1].

Известно, что использование 1% отходов позволяет экономить 2% инвестиций в сырьевой комплекс.

Одним из главных потребителей промышленных отходов в качестве сырьевых ресурсов является строительная отрасль и промышленность строительных материалов. В частности, значительные объемы от-

ходов промышленности используются в производстве и модификации минеральных вяжущих веществ: гипсовых, известковых, клинкерных, малоклинкерных и бесклинкерных. Минеральные вяжущие вещества обеспечивают возможности строительства жилых и общественных, транспортных, гидротехнических и всех разновидностей промышленных зданий и сооружений.

Эффективность использования промышленных отходов в производстве и модификации минеральных вяжущих веществ в России и в мире в целом стала существенно возрастать со второй половины XX в. с развитием в этом направлении научных исследований [2–4], в частности в области использования промышленных отходов в производстве и модификации минеральных вяжущих веществ. К настоящему времени достигнуты следующие результаты:

- разработаны и в разных объемах применяются сотни составов композиционных минеральных вяжущих для улучшения строительных материалов с различными физико-механическими свойствами, скоростью схватывания и твердения, стойкостью к воздействию различных эксплуатационных факторов, различной экономической эффективностью;

- разработаны и применяются для регулирования экономической эффективности, физико-технических и химических свойств минеральных вяжущих и материалов на их основе сотни минеральных и химических добавок;

- разработаны и применяются составы минеральных вяжущих на основе отходов промышленности для захоронения токсичных и радиоактивных отходов [5].

Вместе с тем следует констатировать, что проблема экологии, связанная с защитой окружающей среды от образования и накопления промышленных и бытовых отходов, и проблема их экономически эффективного использования, в том числе в строительстве, промышленности строительных материалов, производстве и модификации минеральных вяжущих веществ, далеки от желаемого решения [6].

Ресурсо- и энергопотребление на единицу валового национального продукта в нашей стране выше, чем в странах Западной Европы и США. Это определяет потенциальные возможности России в ресурсо- и энергосбережении.

Одним из основных источников загрязнения окружающей среды является металлургическая промышленность, включающая производство черных и цветных металлов [7]. Их производство сопровождается образованием отходов, т/т продукции: чугуна — 0,6–0,7; стали — 0,04–0,3; цветных металлов — 10–200.

В конце 2010-х гг. мировое годовое производство составляло: чугуна около 1,1 млрд т; стали — 1,8 млрд т; алюминия — 60 млн т. В России в этот период объемы производства в год составили соответственно: чугуна — 55 млн т; стали — 71 млн т; алюминия — 3,8 млн т [8].

Россия располагает 32% мировых запасов железных руд в общем объеме 57 млрд т. Ежегодная добыча железной руды в России составляет около 15% мировой добычи. Доля черной металлургии в общем объеме промышленного производства составляет около 10%.

Приведенные сведения показывают потенциальные возможности значительного увеличения производства черных металлов. Однако оно должно сопровождаться одновременным опережающим снижением объемов образования и увеличением переработки отходов.

Отходы металлургии характеризуются большим разнообразием: отвалы добычи руд, хвосты обогащения руд и угля металлургических комбинатов, шлаки, шламы, пиритные и колчеданные огарки, колошниковая пыль, пыль газоочистки.

Вскрышные породы от добычи руды черных и цветных металлов в год составляют около 1,1 млрд т, из которых ежегодно утилизируется около 28%, а в отвалах к настоящему времени скопилось более 9 млрд т [7].

Отходы обогащения рудных горных пород составляют в год около 400 млн т, из них утилизируется менее 10%. Общий объем их складирования около 5 млрд т [8].

В числе отходов металлургии наибольшие объемы составляют металлургические шлаки и шламы.

Металлургические шлаки — продукты высокотемпературного взаимодействия компонентов исходных материалов (топлива, руды, плавней и газовой среды) при выплавке металлов.

Шлам (от нем. Schlamm — грязь) — тонкоизмельченные отходы при разработке горного продукта, составляющие пылевые и тончайшие его части, получаемые специально в помольных аппаратах или в виде осадка при промывке рудного сырья.

На российских предприятиях металлургии ежегодно образуется около 80 млн т шлаков, из которых более 45 млн т — доменные, более 20 млн т — сталелитейные и около 10 млн т — цветные [9].

Металлургические шлаки в зависимости от технологического передела подразделяются на следующие разновидности.

Шлаки черной металлургии:

- доменные;

- производства ферросплавов — ферросилиция, феррохрома, ферромарганца, феррованадия, силикомарганца, ферросиликохрома, ферротитана;

- сталелитейные — мартеновские, конверторные, бессемеровские, ваграночные, электрошлакового переплава, электросталеплавильные, производства стали в слитках.

Шлаки цветной металлургии:

- плавки алюминия, бронзы, латуни, меди, олова, цинка, никеля, титана; лигатур на основе алюминия, меди и железа в смеси;

- получения глинозема и алюминиевых руд.

На предприятиях металлургии ежегодно образуется и направляется в хранилища более 20 млн т шла-

мов, которые в зависимости от технологического передела составляют следующие разновидности.

Шламы черной металлургии: обогащения железных руд, агломерационные, доменные, сталеплавильные, окислительные, углеобогащительных фабрик, металлургических комбинатов, газоочисток печей.

Шламы цветной металлургии: производства алюминия — нефелиновый, бокситовый, сульфатный, сульфатно-бокситовый, сульфатно-содобокситовый, монокальциевый, белый, магниевый, цинковый, никелевый, титановый ванадиевый.

Металлургия — один из главных поставщиков вторичных ресурсов в производстве и модификации минеральных вяжущих веществ. По содержанию основных оксидов — кальция, кремния, алюминия и железа отходы металлургии близки к различным гидравлическим вяжущим. Из отходов металлургии в производстве и модификации различных видов портландцемента и глиноземистого цемента почти полностью утилизируются гранулированные доменные шлаки, до 15% — сталелитейных шлаков и до 30% — шлаков цветной металлургии.

Известны разработки и исследования нормально-, быстро- и особобыстротвердеющих жаростойких, безусадочных, сульфатостойких и тампонажных шлакощелочных вяжущих на основе доменных, сталелитейных и цветной металлургии шлаков. Разработаны теоретические и экспериментальные основы получения и управления структурой и свойствами композиционных шлакощелочных вяжущих (на основе доменных гранулированных шлаков Магнитогорского, Челябинского, Орско-Халиловского металлургических комбинатов) с кремнеземистыми (содержание кристаллической фазы от 0 до 95–100%) и алюмосиликатными (содержание $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 60\text{--}90\%$, соотношение $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 = (3,5\text{--}12,6):1$, степень аморфизации 17–65%) минеральными добавками природного (кварцевый песок, известняк, термоактивированные глины, цеолитсодержащие породы) и техногенного происхождения (зола-уноса, микрокремнезем, кирпичный бой, бетонный лом), растворов и бетонов на их основе, базирующиеся на учете факторов, определяющих их структуру и свойства, топологическом моделировании структуры, технологии совмещения компонентов, оценке эффективности минеральных добавок и выявленных закономерностях и установленных зависимостях. Разработаны рядовые и высокопрочные, нормально-, быстро- и особобыстротвердеющие КШЩВ марок до 1200 и на их основе растворы марок до 900 и бетоны классов по прочности до В80, по морозостойкости до F800 и по водонепроницаемости до W25 [10–13].

Значительную ценность для производства различных минеральных вяжущих представляют и шламы металлургической промышленности. Они могут быть использованы в качестве сырьевых компонентов в производстве клинкерных вяжущих, а также в качестве минеральных добавок к различным вяжущим.

В частности, введение 12–15% корректирующей добавки бокситового шлама при производстве портландцементного клинкера позволяет снизить температуру обжига на 70°C и соответственно сэкономить энергетические затраты.

Шлаки и шламы металлургической промышленности применяются в значительных объемах для производства бесклинкерных и малоклинкерных, автоклавных и местных вяжущих: известково-шлаковых, шлаковых, сульфатно-шлаковых и др. [14].

Увеличение использования объемов и разновидностей отходов металлургии и других (горнодобывающей, топливно-энергетической, химической, строительной и т. д.) отраслей промышленности является одним из эффективных направлений комплексного решения проблем экологии и развития промышленности строительных материалов [15]. Рост строительной индустрии, в свою очередь, обеспечит рост циркулярной экономики промышленных регионов и России в целом [16].

В 2021 г. строительный комплекс России достиг рекордного успеха в объеме жилищного строительства, увеличив его на 30% [17]. Этот успех достигнут на фоне систематического роста цен на строительные материалы, в том числе на цемент, которые только с марта 2020 г. по январь 2021 г. выросли по всей стране на 70–75% [18].

Исторически сложилось, что базовыми для производства строительных материалов минеральными вяжущими веществами стали гипсовые, известковые и цементы. В производстве этих вяжущих и материалов на их основе с использованием природных и вторичных сырьевых ресурсов отмечаются значительные нереализованные возможности и резервы [19, 20].

В течение последнего столетия объемы производства и номенклатура малоэнергоёмких и экологически чистых в производстве и применении гипсовых вяжущих и материалов на их основе и применение их в строительстве возросли в мире в десятки раз. По утверждению некоторых специалистов, это позволило отдельным странам достигнуть революционных успехов в повышении производительности труда и экономии энергетических ресурсов. В частности, в Германии объем применения гипсовых вяжущих достиг 25–27% общего объема минеральных вяжущих. Значительный вклад в развитие научных исследований и разработок гипсовых вяжущих внесли отечественные ученые. Россия располагает половиной мировых разведанных запасов гипсового сырья, но по объему его добычи (около 6,6 млн т) и производства материалов на его основе уступает Китаю и США соответственно более чем в шесть и три раза. Значительным малоиспользуемым гипсовым сырьевым ресурсом являются гипсосодержащие побочные продукты и отходы промышленности — фосфогипс, энергогипс, борогипс и др.

В последнем десятилетии объем годового производства извести в России составил около 12,5 млн т,

в том числе строительной — около 6 млн т. В 2019 г. мировое производство извести составляло 430 млн т, из которых 70% произведено в Китае. В производстве извести используется природное и техногенное известьсодержащее сырье. Россия по объему производства извести, составляющего менее 3%, занимает четвертое место в мире. Во многих странах производятся значительные объемы местных вяжущих, в том числе с использованием отходов промышленности: гидравлической извести, романцемента, известково-золевых, известково-шлаковых, известково-песчаных вяжущих. Отдельные разновидности импортируются в Россию.

В 1980-х гг. СССР занимал первое место в мире среди стран по производству цемента. Это было связано и с деятельностью существовавшего в то время Министерства промышленности строительных материалов. После резкого спада в 1990-х гг. в последних десятилетиях производство цемента систематически возрастало. Этому способствовало и введение в России нормативных документов по ресурсо- и энергосбережению и обращению с отходами в цементной промышленности, в частности ГОСТ Р 54194–2010 «Производство цемента. Наилучшие доступные технологии повышения энергоэффективности», ГОСТ Р 56828.26–2017 «Наилучшие доступные технологии. Ресурсосбережение. Аспекты эффективного обращения с отходами в цементной промышленности». Достигнуты определенные успехи в освоении производства и новых эффективных разновидностей строительных материалов. Однако по производству цемента Россия в настоящее время занимает восьмое место среди стран мира, уступая Китаю в сорок раз. Китай в последние десятилетия занимает по производству цемента первое место в мире, ежегодно производя 2–2,2 млрд т — более половины всего мирового производства. Очевидно, с этим в том числе связаны успехи китайской экономики в целом. В России этот показатель составляет около 55 млн т. В отдельные годы импорт цемента в Россию из Белоруссии, Казахстана, Украины и других стран превышает его экспорт.

Со сложившимся уровнем производства минеральных вяжущих, в том числе цемента, связано в определенной мере систематическое повышение цен на строительные материалы, что отражается на экономике страны в целом и ресурсном обеспечении ее экономического развития.

Список литературы

1. Будущее мировой экономики. Доклад группы экспертов ООН во главе с В. Леонтьевым. М.: Международные отношения, 1979. 212 с.
2. Боженков П.И. Комплексное использование минерального сырья для производства строительных материалов. М.: Госстройиздат, 1963.
3. Волженский А.В., Буров Ю.С., Виноградов Б.Н., Гладких В.И. Бетоны и изделия из шлаковых и золевых материалов. М.: Госстройиздат, 1969.

Сложившийся уровень производства цемента связан с состоянием предприятий цементной промышленности, в которой отмечаются:

- повышенная энергозатратность [21];
- высокий износ технологического оборудования, устаревшие технологии, низкая степень автоматизации производства [22];
- недостаточный уровень замены части клинкера минеральными добавками, использования альтернативных видов топлива и вторичных сырьевых ресурсов [23];
- уменьшение объемов производства шлакопортландцемента — до 2,5% в 2020 г. [24].

Для устранения недостатков современного состояния и повышения экономической, энерго- и ресурсоэффективности промышленности строительных материалов и производства минеральных вяжущих веществ необходимо повысить уровень государственного сопровождения ее развития. По результатам многофакторного технико-экономического анализа может оказаться целесообразным воссоздание в составе строительного комплекса России Министерства промышленности строительных материалов. Это благотворно скажется на многих нуждающихся в модернизации предприятиях отрасли и послужит эффективному использованию природных и техногенных сырьевых ресурсов в производстве строительных материалов при реализации национальных проектов по обеспечению комфортной среды для жизни: «Экология», «Жилье и городская среда» и «Безопасные и качественные автомобильные дороги», «Образование», «Здравоохранение», «Культура».

References

1. The future of the world economy. Report of the UN group of experts headed by V. Leontiev. Moscow: International relations. 1979. 212 p. (In Russian).
2. Bozhenov P.I. Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ja dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov [Integrated use of mineral raw materials for the production of building materials]. Moscow: Gosstroyizdat. 1963.
3. Volzhenskiy A.V., Burov Yu.S., Vinogradov B.N., Gladkikh V.I. Betony i izdeliya iz shlakovykh i zol'nykh materialov [Concretes and products based on slag and ash materials]. Moscow: Gosstroyizdat. 1969.
4. Glukhovskiy V.D., Pakhomov V.A. Shlakoshhelochnye vjzhushhie i betony [Alkali-activated slag cements and concretes]. Kiev: Budivel'nik. 1978. 184 p.
5. Rahman R.O.A., Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R., Ojovan M.I. Cementitious materials for nuclear wastes immobilization, Wiley. 2015. 231 p.
6. Bloshenko T.A., Gilyarova A.A., Goncharova L.I., Knysh V.A., Larichkin F.D., Melik-Gaikazov I.V., Nevskaya M.A., Novosel'tseva V.D., Perein V.N., Fedoseev S.V. Racional'noe ispol'zovanie vtorichnykh mineral'nykh resursov v usloviyakh jekologizatsii i vnedreniya dostupnykh tehnologij [Rational use of secondary mineral resources in conditions of greening

4. Глуховский В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные вяжущие и бетоны. Киев: Будивельник, 1978. 184 с.
5. Rahman R.O.A., Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R., Ojovan M.I. Cementitious materials for nuclear wastes immobilization. Wiley, 2015. 231 p.
6. Bloshenko T.A., Gilyarova A.A., Goncharova L.I., Knysh V.A., Larichkin F.D., Melik-Gaykazarov I.V., Nevskaya M.A., Novoselytseva V.D., Perein V.N., Fedoseev S.V. Рациональное использование вторичных минеральных ресурсов в условиях экологизации и внедрения доступных технологий. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. 252 с.
7. Бархатов В.Н., Добровольский И.П., Капкаев Ю.М. Отходы производства и потребления — резерв строительных материалов. Челябинск: Изд-во Челябинского государственного университета, 2017. 477 с.
8. Долгарев А.В. Вторичные сырьевые ресурсы в производстве строительных материалов: Физико-химический анализ: Справочное пособие. М.: Стройиздат, 1990. 456 с.
9. Русина В.В. Минеральные вяжущие вещества на основе многотоннажных промышленных отходов. Братск: БрГУ, 2007. 224 с.
10. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Reaction products, structure and properties of alkali-activated metakaolin cements incorporated with supplementary materials // *Journal of materials research and technology*. 2018. No. 6, pp. 364–373.
11. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Toward clean cement technologies: A review on alkali-activated fly-ash cements incorporated with supplementary materials // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2019. No. 509, pp. 31–41.
12. Rakhimova N.R. Recent advances in blended alkali-activated cements: a review // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2020. DOI: 10.1080/19648189.2020.1858170
13. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З. Механизм отверждения боратных солевых растворов шлакощелочными вяжущими // *Цемент и его применение*. 2016. № 3. С. 96–99.
14. Павленко С.И., Луханин М.В., Мышляев Л.П., Аввакумов Е.Г., Корнеева Е.В. Малоцементные и бесцементные вяжущие и мелкозернистые бетоны различного назначения из вторичных минеральных ресурсов. Новосибирск: СО РАН, 2010. 322 с.
15. Рахимов Р.З., Магдеев У.Х., Ярмаковский В.Н. Экология, научные достижения и инновации в производстве строительных материалов на основе и с применением техногенного сырья // *Строительные материалы*. 2009. № 12. С. 3–5.
16. Хозин В.Г., Хританков В.Ф., Пичугин А.П. Роль строительной индустрии в становлении циркулярной экономики промышленных регионов России // *Строительные материалы*. 2021. № 1–2. С. 6–9. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-6-12>
- and introduction of available technologies]. Apatity: FITs KNTs RAN. 2019. 252 p.
7. Barkhatov V.N., Dobrovolskii I.P., Kapkaev Yu.M. Othody proizvodstva i potrebleniya — rezerv stroitel'nykh materialov [Production and consumption wastes — reserve of construction materials]. Chelyabinsk: Chelyabinsk State University Publishing House. 2017. 477 p.
8. Dolgarev A.V. Vtorichnye syr'evye resursy v proizvodstve stroitel'nykh materialov: Fiziko-himicheskij analiz. Spravochnoe posobie [Secondary raw materials in the production of building materials: Physical and chemical analysis]. Moscow: Stroyizdat. 1990. 456 p.
9. Rusina V.V. Mineral'nye vjashushhie veshchestva na osnove mnogotonnazhnykh promyshlennykh othodov [Mineral binders based on multi-tonnage industrial wastes]. Bratsk: BrGU. 2007. 224 p.
10. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Reaction products, structure and properties of alkali-activated metakaolin cements incorporated with supplementary materials. *Journal of materials research and technology*. 2018. No. 6, pp. 364–373.
11. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Toward clean cement technologies: A review on alkali-activated fly-ash cements incorporated with supplementary materials. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2019. No. 509, pp. 31–41.
12. Rakhimova N.R. Recent advances in blended alkali-activated cements: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2020. DOI: 10.1080/19648189.2020.1858170
13. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Mechanism of borate saline solutions solidification by alkali-activated slag cements. *Tsement i ego primenenie*. 2016. No. 3, pp. 96–99. (In Russian).
14. Pavlenko S.I., Lukhanin M.V., Myshlyayev L.P., Avvakumov E.G., Korneeva E.V. Malo cementnye i bes cementnye vjashushhie i melkozernistye betony razlichnogo naznachenija iz vtorichnykh mineral'nykh resursov [Low-clinker and clinker-free cementitious and fine-grained concretes for various purposes from secondary mineral resources]. Novosibirsk: SO RAN. 2010. 322 p.
15. Rakhimov R.Z., Magdееv U.Kh., Yarmakovskii V.N. Ecology, scientific achievements and innovations in the production of building materials based on and using technogenic raw materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 12, pp. 3–5. (In Russian).
16. Khozin V.G., Khritankov V.F., Pichugin A.P. A Role of the building industry in the development of a circular economy of industrial regions of Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 1–2, pp. 6–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-6-12>
17. Technical regulation problem in construction within 100+Technobuild. *Stroitel'naya gazeta*. 2021. No. 39. (In Russian).

17. Проблема технического регулирования в строительстве в рамках 100+Technobuild // *Строительная газета*. 2021. № 39.
18. Щеглов А. Эффективного ответа на удорожание строительных материалов пока не найдено // *Строительная газета*. 2021. № 27.
19. Рахимов Р.З. Гипс в строительстве с древних времен до современности // *Academia. Архитектура и строительство*. 2021. № 4. С. 170–175.
20. Семенов А.А. Обзор рынка товарной извести: итоги 2019 г., прогноз на 2020 г. // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 4–7. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-4-7>
21. Витт О.С. Современное состояние отечественной цементной промышленности и проблемы ее конкурентоспособности // *Стратегия развития экономики*. 2011. № 17 (110). С. 48–51.
22. Шевченко И.В., Григорьева Е.А. Реструктуризация предприятий и отраслей промышленного производства Красноярского края (по материалам цементной промышленности) // *Стратегия развития экономики*. 2011. № 17 (110). С. 52–55.
23. Скобло Л.И. Цементная промышленность на постсоветском пространстве сегодня: Обзорение // *Цемент и его применение*. 2018. № 1. С. 26–28.
24. Василик Ш.Ю., Еремина Е.М. Цементная промышленность в 2020 году // *Цемент и его применение*. 2020. № 6. С. 3–10.
18. Shcheglov A. An effective response to the rise in the cost of building materials has not yet been found. *Stroitel'naya gazeta*. 2021. No. 27. (In Russian).
19. Rakhimov R.Z. Gypsum in construction from ancient times to modern times. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2021. No. 4, pp. 170–175. (In Russian).
20. Semenov A.A. Semenov A.A. Overview of the Russian market of commercial lime: results of 2019 and forecast for 2020. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2020. No. 4–5, pp. 4–7. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-4-7>
21. Vitt O.S. The current state of the local cement industry and the problems of its competitiveness. *Strategiya razvitiya ekonomiki*. 2011. No. 17 (110), pp. 48–51. (In Russian).
22. Shevchenko I.V., Grigor'eva E.A. Restructuring of enterprises and industries of the Krasnoyarsk Territory (based on materials from the cement industry). *Strategiya razvitiya ekonomiki*. 2011. No. 17 (110), pp. 52–55. (In Russian).
23. Skoblo L.I. Cement industry in the post-Soviet space today. Review. *Tsement i ego primeneniye*. 2018. No. 1, pp. 26–28. (In Russian).
24. Vasilik Sh.Yu., Eremina E.M. Cement industry in 2020. *Tsement i ego primeneniye*. 2020. No. 6, pp. 3–10. (In Russian).

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Книга «Теоретические основы белизны и окрашивания керамики и портландцемента»

Авторы – Зубехин А.П., Яценко Н.Д., Голованова С.П.

В книге представлены теоретические основы белизны и окрашивания керамических строительных материалов и белого портландцемента (БПЦ) с позиции теории цветности силикатных материалов в зависимости от их фазово-минерального состава, структуры, содержания хромофоров Fe, Mn и Ti, условий обжига и охлаждения (окислительных или восстановительных).

Установлены закономерности зависимости белизны, цвета и особенности окрашивания как пигментов, так и твердых растворов бесцветных фаз ионами-хромофорами от структуры, изовалентного или гетеровалентного изоморфизма, образования окрашивающих кластеров. Разработаны эффективные способы управления белизной и декоративными свойствами строительных керамических материалов (фарфора, фаянса, облицовочной плитки, кирпича) и белого портландцемента.



Книга «Технология гипсовых отделочных материалов и изделий»

Автор – Федулов А.А.

В книге описано производство гипсовых отделочных материалов и изделий от добычи сырья до упаковки готовой продукции. Особое внимание автор уделяет подробному описанию технологических линий и отдельных единиц оборудования, установленных на передовых предприятиях гипсовой промышленности. В книге представлено большое количество иллюстраций всех технологических переделов, которые помогут глубже представить и понять технологические процессы производства того или иного изделия. Описание технологии каждого вида гипсовых изделий основывается на существующих производственных регламентах предприятий России, Германии и Дании, включая шахты, карьеры, которые автор посещал лично.

Книга предназначена студентам, изучающим производство строительных материалов и конструкций в качестве дополнительного материала по технологии современных гипсовых изделий, а также для инженеров-технологов заводов, производящих гипсовую продукцию в качестве справочного материала.



Заказать литературу можно через редакцию, направив заявку по e-mail: mail@rifsm.ru, по тел.: (499) 976-22-08, 976-20-36; или оформить заказ на сайте www.rifsm.ru

М.А. МАЛЫГИНА, инженер (m.turobova@narfu.ru),
А.М. АЙЗЕНШТАДТ, д-р хим. наук (a.isenshtadt@narfu.ru),
Т.А. ДРОЗДЮК, зав. лабораторией (t.drozdyuk@narfu.ru),
М.А. ФРОЛОВА, канд. хим. наук,
М.А. ПОЖИЛОВ, студент (pozhirov.m@edu.narfu.ru)

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова (163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 17)

Структурная модификация сапонитсодержащего материала при его механическом диспергировании

Экологическая проблематика, связанная с рациональным природопользованием, является одним из немногих приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в России. Решение экологических проблем невозможно без новых минерально-сырьевых ресурсов. Актуальной задачей является вовлечение в производство сырья из техногенных отходов горнодобывающих предприятий, которое исчисляется сотнями тысяч тонн и продолжает постоянно увеличиваться, что ведет к загрязнению окружающей среды и осложнению экологической обстановки в целом. Таким отходом, например, является сапонитсодержащий материал, полученный при обогащении кимберлитовых руд месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова Архангельской алмазной провинции. Модификация этого отхода с целью его дальнейшего использования в индустрии строительных материалов является перспективным направлением исследований. В работе проанализирован процесс механического диспергирования сапонитсодержащего материала как один из возможных путей его модификации, приводящий к синтезу из активных оксидных соединений, образующихся в процессе разрушения кристаллической решетки минералов группы серпентина. В качестве информационного параметра, позволяющего получать количественную характеристику данного синтеза, предложено использовать величину теплового эффекта модификации сапонита при температуре 820°C. Выявлено, что предварительное отстаивание суспензии оборотной воды позволяет выделить методом электролитной коагуляции твердую фазу с содержанием сапонита до 85%. Установлен факт наличия у опытных образцов аморфной фазы, причем, несмотря на возрастание удельной поверхности порошков при увеличении продолжительности помола до 60 мин, степень аморфизации поверхности исследуемых дисперсных систем имеет практически постоянное значение.

Ключевые слова: сапонитсодержащий материал, серпентин, магнезиальная глина, минеральные порошки, механический помол, экзотермический тепловой эффект.

Исследования проводились на УНУ «Физическая химия поверхности нанодисперсных систем» при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-23-00047.

Для цитирования: Малыгина М.А., Айзенштадт А.М., Дроздук Т.А., Фролова М.А., Пожилов М.А. Структурная модификация сапонит-содержащего материала при его механическом диспергировании // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-32-38>

M.A. MALYGINA, Engineer (m.turobova@narfu.ru), A.M. AYZENSHTADT, Doctor of Sciences (Chemistry), (a.isenshtadt@narfu.ru),
T.A. DROZDYUK, Head of Laboratory (t.drozdyuk@narfu.ru), M.A. FROLOVA, Candidate of Sciences (Chemistry),
M.A. POZHILOV, Student, (pozhirov.m@edu.narfu.ru)
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (17, Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation)

Structural Modification of Saponite-Containing Material During its Mechanical Dispersion

Environmental issues related to the rational use of natural resources are one of the few priority areas for the development of science, technology and technic in Russia. The solution of environmental problems is impossible without new mineral resources. An urgent task is to involve in the production of raw materials from technogenic waste of mining enterprises, which amounts to hundreds of thousands of tons, and continues to increase constantly, which leads to environmental pollution and complication of the environmental situation as a whole. Such a waste, for example, is a saponite-containing material obtained during the enrichment of kimberlite ores of the diamond deposit named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk Diamond Province. Modification of this waste for the purpose of its further use in the building materials industry is a promising area of research. The paper analyzes the process of mechanical dispersion of saponite-containing material as one of the possible ways of its modification, leading to the synthesis of serpentine group minerals from active oxide compounds formed during the destruction of the crystal lattice. As an information parameter that makes it possible to obtain a quantitative characteristic of this synthesis, it is proposed to use the value of the thermal effect of saponite modification at a temperature of 820°C. It is revealed that the preliminary settling of the recycled water suspension makes it possible to isolate a solid phase with a saponite content of up to 85% by the method of electrolyte coagulation. The fact of the presence of an amorphous phase in the test samples was established, and, despite the increase in the specific surface of the powders with an increase in the duration of grinding to 60 min, the degree of amorphization of the surface of the studied disperse systems has a practically constant value.

Keywords: saponite containing material, serpentine, magnesite clay, mineral powders, mechanical grinding, exothermic thermal effect.

The research was carried out at the UNU “Physical Chemistry of the surface of nanodisperse systems” with the financial support of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-23-00047.

For citation: Malygina M.A., Ayzenshtadt A.M., Drozdjuk T.A., Frolova M.A., Pozhilov M.A. Structural modification of saponite-containing material during its mechanical dispersion. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 32–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-32-38>

Расширение ресурсной базы индустрии строительных материалов экономически рационально осуществлять путем применения местного сырья и энергоэффективных технологий. В этом плане актуальной современной задачей является вовлечение в производство сырья, нуждающегося в незначительной корректировке и улучшении свойств. Такими перспективными материалами являются отходы (техногенные месторождения) горнодобывающих предприятий [1]. Следует подчеркнуть, что реализация данного направления связана с Концепцией национальной безопасности и является важнейшей составляющей Экологической доктрины и Основ экологической политики Российской Федерации на период до 2030 г. [2].

В качестве классического примера при образовании подобной техногенной сырьевой базы может рассматриваться горноперерабатывающее предприятие Архангельской алмазной провинции. Уникальность месторождения им. М.В. Ломоносова обусловлена высоким качеством алмазного сырья и тем, что породы трубок месторождения практически полностью замещены глинистыми минералами (преимущественно сапонитом 60–70%) [3]. В процессе обогащения кимберлитовых руд песчано-глинистые породы в обводненном состоянии направляются в хвостохранилища, где ежегодно складывается до 4 млн т отходов. При промышленной разработке месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова сапонитсодержащий отход находится в водной среде в виде суспензии, затрудняя использование технологической воды в системе оборотного водоснабжения. Это связано с высокой концентрацией тонкодисперсных сапонитовых шлам в технологических водах (концентрация взвешенных веществ до 400 г/л), низкой скоростью осветления оборотной воды, что, в свою очередь, приводит к отсутствию высокоэффективной системы замкнутого водооборота и быстрому заполнению хвостохранилища отходами. Вместе с тем вопрос осветления оборотной воды решается с помощью метода электролитной коагуляции, основанного на введении в суспензию оптимальной концентрации хлорида магния [4]. Отделение при этом сапонитсодержащего осадка и его последующая консолидация позволяет получить полиминеральную систему (табл. 1) для дальнейшего использования в качестве компонента строительных материалов различного функционального назначения [7–10].

В работе [3] отмечается, что отходы обогащения кимберлитовых руд при добыче алмазов (месторождение им. М.В. Ломоносова) можно рассматривать как техногенные месторождения магнезиальных глин. Утилизация таких глин приведет к повышению рентабельности разработки месторождения в целом. В исследованиях [11–15] показана эффективность использования подобных глин для синтеза магнезиального вяжущего вещества, причем отмечается [16, 17], что механическая активация магнийсодержащего сырья приводит к изменению его структуры,

Таблица 1

Table 1

Минеральный состав сапонитовых глин [5, 6]
Mineral composition of saponite clays [5, 6]

Минерал	Содержание, мас. %
Флогопит	4,09±1,94
Кварц	7,62±0,46
Доломит	1,91±0,43
Монтмориллонит	7,34±1,96
Палыгорскит	6,83±3,35
Тальк	2,99±1,14
Клинохлор	3,69±1,13
Коллинсит	2,69±0,8
Сапонит	62,84±2,09

способствующей повышению химической активности. По данным работы [18], при механоактивации сапонитсодержащего отхода помол до размерных характеристик частиц 445 нм связан с образованием аморфной фазы, содержание которой увеличивается с 20 (у исходного) до 40%. В исследованиях [19] авторами методами дифференциального термического и рентгенофазного анализов показано, что в присутствии водной фазы механоактивация сапонита приводит сначала к образованию активных оксидных соединений магния и кремния с последующим синтезом серпентина по схеме:



Образовавшийся в результате реакции (1) серпентин, по мнению авторов, можно рассматривать в качестве основы магнезиального цемента, так как в процессе высокотемпературной обработки происходит его дегидратация с образованием форстерита [20]:



Таким образом, одним из основных режимных параметров получения магнезиального вяжущего из сапонитсодержащего отхода процесса обогащения кимберлитовых руд является механическая диспергация выделенной твердой фазы из оборотной воды. Поэтому целью настоящей работы является установление возможной взаимосвязи между параметром (временным режимом) механического помола (для используемого помольного аппарата) сапонитсодержащего материала и количественным образованием серпентина по схеме (1). Для количественной оценки процесса в качестве информационного параметра нами в проведенных экспериментах использована величина соответствующего теплового эффекта (изменение энтальпии), полученного в результате реализации дифференциального термогравиметрического анализа опытных проб.

Следует отметить, что используемый прием выделения твердой фазы из суспензии оборотной воды [21] вследствие наличия значительного количества сопутствующих минералов позволяет получить

Таблица 2
Table 2Минеральный элементный состав образцов ССМ
Mineral elemental composition of SCM samples

Образец	Содержание элемента, %									
	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Cr	Fe	Ni	Sr
ССМ1	22,8	4,8	47,7	1,8	6,4	1,2	0,3	14,6	0,3	0,2
ССМ2	15,3	6,7	46,7	3,5	7,6	1,6	–	18,3	0,3	–

Таблица 3
Table 3Удельная поверхность порошков ССМ2, полученных при разном времени (t) помола
Specific surface area of ССМ2 powders obtained at different times (t) of grinding

t, мин	0	10	20	30	40	60
S _{уд} , м ² /кг	232	1256	1415	1528	1577	1548

только 65% сапонитсодержащий материал. Поэтому перед реализацией метода разрушения водной суспензии, основанного на принципах электролитной коагуляции (перед введением электролита-коагулянта), анализируемые пробы подвергались отстаиванию, в результате которого происходит самопроизвольная седиментация наиболее грубодисперсной части твердой фазы. Агрегативно и седиментационно устойчивая сапонитовая твердая фаза, характеризующаяся коллоидной степенью дисперсности [22], сохраняется во взвешенном состоянии в водной дисперсионной среде.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовалась оборотная вода обогатительной фабрики, поступающая на обогащение с поверхности пруда-отстойника хвостохранилища. Для удаления максимального количества сопутствующих минералов и грубодисперсных частиц песчаной фракции суспензия оборотной воды была подвергнута предварительному отстаиванию в продолжение 30 мин. После чего сапонитсодержащий материал был выделен из суспензии путем электролитной коагуляции, основанной на переводе высокодисперсных частиц твердой фазы в состояние, близкое к изоэлектрическому, при добавлении в исходную суспензию оптимального количества раствора хлорида магния (концентрация электролита в реакционной среде 1,1–2 моль/л; время осветления 70 мин). Полученную твердую фазу высушивали и доводили до постоянной массы при температуре 105°C.

В дальнейшем образцы подвергали механическому помолу до получения разной величины площади удельной поверхности, применяя сухой способ механического диспергирования на планетарной шаровой мельнице Retsch PM10 в течение 10, 20, 30, 40 и 60 мин. Величину удельной поверхности оценивали методом фильтрации газа на приборе ПСХ-10.

Элементный состав порошка сапонитсодержащего материала, полученного до и после предварительного отстаивания, определяли методом рентгено-флуоресцентной спектроскопии на анализаторе

ПРФА «МетЭксперт». Для исследований из полученных порошков на гидравлическом прессе ПЛГ-20 были изготовлены образцы-запрессовки диаметром 10 мм при воздействии в течение 2 мин фиксированного избыточного усилия в 16 т.

При определении степени кристалличности использовался рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-7000 S (ЦКП САФУ «Арктика»). Дифрактограммы проб записывались в диапазоне сканирования по углу 2θ – от 10 до 700; скорость сканирования 0,5 град/мин, шаг 0,02.

Термохимические исследования, связанные с измерениями тепловых эффектов, проводили методом дифференциального термogravиметрического анализа на совмещенном термоанализаторе SDT 650 d в интервале температуры 0–900°C. Изменение структурных параметров фиксировалось по изменению энтропии экзоэффекта рассматриваемых образцов.

Результаты и обсуждения

Сравнительный анализ по химическому составу выделенных образцов сапонитсодержащего материала из водной суспензии оборотной воды, отобранной с глубины 1 м прудковой зоны хвостохранилища обогатительной фабрики методом прямой коагуляции (ССМ1) и с предварительным отстаиванием при 20±2°C (ССМ2) и удалением грубодисперсного осадка (полученная твердая фаза двух образцов доводилась до постоянной массы при температуре 105±2°C), представлен в табл. 2.

Проведенный рентгенофлуоресцентный анализ образцов показал, что основными минеральными элементами ССМ являются Si, Mg, Al, Fe, Ca и K, содержание которых составляет 98%. В работе [23] в качестве объекта исследований (ССМ1) была использована выделенная из суспензии оборотной воды твердая фаза с содержанием именно сапонита не превышающим 63%. Остальной составляющий компонент данной пробы представлял собой полиминеральный песок, содержащий такие минералы, как кварц, доломит, тальк, флогопит и др. (табл. 1). Выделение твердой фазы из водной дисперсионной

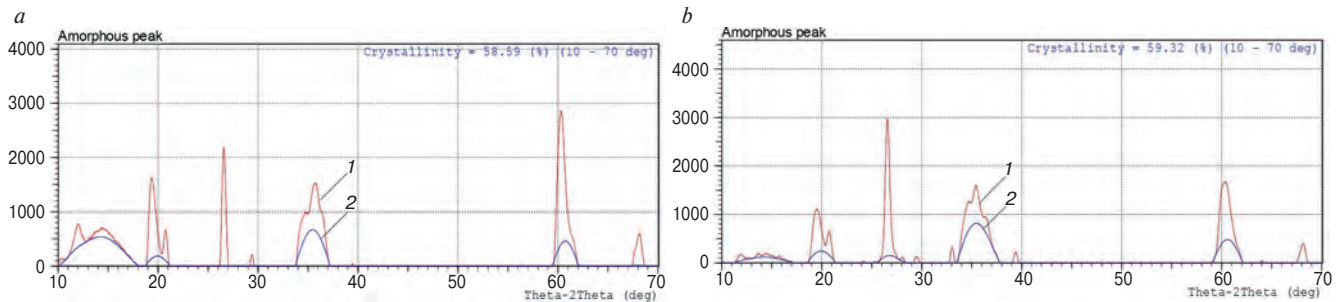


Рис. 1. Дифрактограмма: *a* – исходного ССМ; *b* – ССМ после механоактивации в течение 60 мин; 1 – кристаллическая часть; 2 – аморфная часть
Fig. 1. Diffractograms of: *a* – the original SCM; *b* – SCM after mechanical activation for 60 min; 1 – crystal part; 2 – amorphous part

среды методом электролитной коагуляции после предварительного отстаивания суспензии позволило получить образцы со значительно увеличенным количественным содержанием сапонита. Так, расчет массового соотношения содержания магния и алюминия в полученных пробах и сопоставление этой величины с данными, полученными по соотношению формульных молекулярных масс этих элементов в сапоните (исходя из его общей молекулярной формулы $Mg_3[AlSi_3O_{10}](OH)_2 \cdot 4H_2O$ [24]), показал, что содержание сапонита доведено до 85%. Для проведения расчета использовались результаты анализа минерального состава по содержанию элементов Mg (15,3%) и Al (6,7%) в образце ССМ2 (табл. 2). Формульное молекулярно-массовое соотношение этих элементов составляет 2,7. В выделенном опытном образце ССМ2 после предварительного удаления сопутствующих минералов эта величина равна 2,3. Для дальнейших исследований нами использован сапонитсодержащий материал, полученный из суспензии оборотной воды после предварительного отстаивания пробы (образец ССМ2).

Результаты изменения удельной поверхности ($S_{уд}$) образцов ССМ2 фильтрационным методом после их механического помола при различном временном режиме представлены в табл. 3.

Аппроксимация функциональной зависимости $S_{уд}=f(t)$ различными математическими выражениями показала, что наилучший коэффициент достоверности ($R^2=0,97$) имеет уравнение полинома третьей степени следующего вида:

$$S_{уд} = 0,03t^3 - 3,15t^2 + 113,79t + 275,94. \quad (3)$$

При этом можно отметить, что порошки ССМ2 после времени помола 40 мин на используемом оборудовании (планетарная шаровая мельница) характеризуются достижением практически предельного значения удельной поверхности $S_{уд}=1562 \pm 15$ м²/кг. При продолжительности помола более 40 мин происходит стабилизация структурных изменений сапонитсодержащего материала, что, по мнению авторов, объясняется значительной величиной поверхностной энергии, связанной с образованием дополнительной поверхности порошковой системы и ее компенсацией за счет самопроизвольной агломерации тонкодисперсных частиц размалываемых порошков.

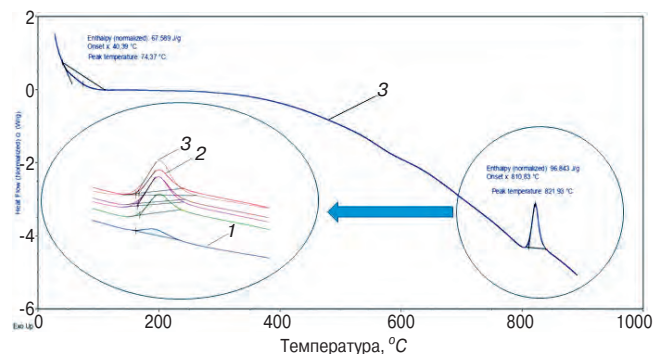


Рис. 2. Термограммы порошков ССМ2: 1 – не подвергнутого механическому помолу; 2, 3 и 3 – порошки после механического помола в продолжение 20 и 60 мин
Fig. 2. Thermograms of SCM2 powders: 1 – not subjected to mechanical grinding; 2, 3 and 3 – powders after mechanical grinding for 20 and 60 min

При определении степени кристалличности порошков сапонитсодержащего материала, полученных после механического помола на планетарной шаровой мельнице при разном времени помола, установлен факт наличия аморфной фазы, причем, несмотря на возрастание удельной поверхности образцов (от 232 до 1548 м²/кг) при увеличении продолжительности помола до 60 мин (с шагом в 10 мин), степень аморфизации поверхности исследуемых дисперсных систем имеет практически постоянное значение, сравнимое с этим параметром для порошка ССМ2, не подвергнутого механическому дроблению (рис. 1). Так, среднее количественное содержание аморфной фазы для всех анализируемых проб составило $(61 \pm 3)\%$. Вместе с тем, как было отмечено выше, аналогичная механическая обработка сапонитсодержащего материала приводит к двукратному увеличению содержания аморфной фазы порошков при времени помола 90 мин. Объяснением данному противоречию могут служить следующие обстоятельства. В упомянутой работе в качестве объекта исследований (ССМ) была использована выделенная из суспензии оборотной воды твердая фаза с содержанием именно сапонита, не превышающим 63%. Остальной составляющий компонент данной пробы представлял собой полиминеральный песок. Исходя из этого увеличение содержания аморфной фазы в опытных образцах при их механическом диспергировании в данном случае могли обеспечивать сопутствующие минералы, обладающие более высо-

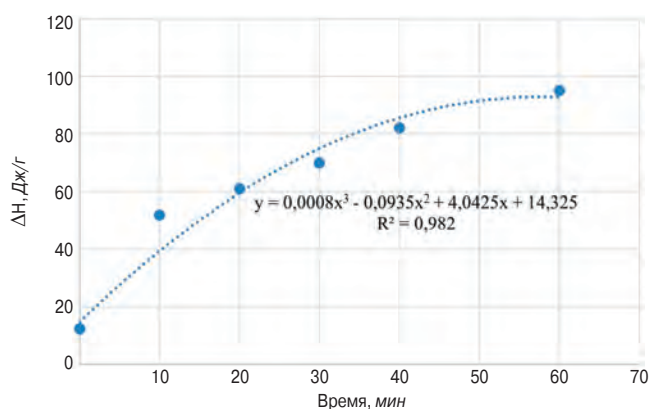


Рис. 3. Зависимость величины теплового эффекта от времени помола сапонитсодержащего материала

Fig. 3. The dependence of the magnitude of the thermal effect on the grinding time of the saponite-containing material

кой размолоспособностью. Таким образом, наличие значительного содержания аморфной фазы в образцах ССМ и обуславливает его активность в качестве компонента в вяжущих композициях.

В представленном эксперименте перед выделением твердой фазы ССМ2 для удаления максимального количества сопутствующих минералов суспензия оборотной воды была подвергнута предварительному отстаиванию в продолжение 30 мин. В результате этого процесса последующее выделение твердой фазы из водной дисперсионной среды позволило получить образцы со значительно увеличенным количественным содержанием сапонита (до 85%). Кроме того, еще в [25, 26] отмечается, что изменение размера частиц (удельной поверхности) не является единственным результатом механического воздействия при помоле твердофазных материалов. В процессе диспергирования происходит не только разрушение частиц, но и их агрегация, как самопроизвольная, так и вызванная внешними сжимающими силами. Кроме того, при измельчении происходят изменения кристаллической структуры и энергетического состояния поверхностных слоев частиц, возникают контактные разности потенциалов, наблюдается эмиссия электронов. Например, при измельчении кальцит самопроизвольно переходит в арагонит. По всей видимости, аналогичные причины вызывают перестройку кристаллической структуры сапонита, который при механическом измельчении в используемом режиме помола самопроизвольно (через стадию, описываемую уравнением I) переходит в минералы группы серпентина. Подтверждением данного превращения служат результаты дифференциально-термического анализа порошка ССМ2. Полученные термогравиметрические кривые (рис. 2) опытных образцов имеют четкий экзотермический эффект при температуре 820°C, соответствующий минералам группы серпентина [19], однако количественно (изменение энтальпии, ΔH) этот эффект проявляется по-разному (на рис. 2 в качестве примера показаны величины теплового эффекта для исходного порошка ССМ2 и полученных после 20 и

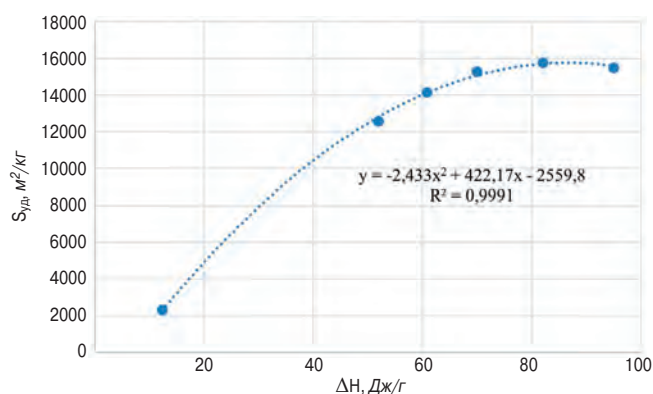


Рис. 4. Зависимость удельной поверхности порошков сапонитсодержащего материала от величины теплового эффекта

Fig. 4. The dependence of the specific surface of powders of saponite-containing material on the magnitude of the thermal effect

60 мин помола порошков). Так, для образца ССМ2 до механического размола $\Delta H_{820} = 12,3$ Дж/г; при времени помола 60 мин $\Delta H = 96,8$ Дж/г. Наличие в исходном образце ССМ2 минералов группы серпентина свидетельствует, что при наличии связанной воды (термоэффект при 80°C отмечается даже у исходного ССМ, высушенного и доведенного до постоянной массы) активные оксидные компоненты сапонитсодержащего материала способствуют синтезу минералов группы серпентина по схеме (1).

Данные, представленные на рис. 3 и 4 (функциональная зависимость $\Delta H_{820} = f(t)$ и $\Delta H_{820} = f(S_{уд})$ соответственно), показывают, что синтез серпентина связан со структурными изменениями испытуемых образцов, направленных на увеличение их удельной поверхности. Для синтеза максимального количества серпентина время помола на используемом размольном аппарате должно быть не менее 40 мин.

Выводы

В качестве основных результатов проведенных исследований можно отметить следующие положения.

1. Предварительное отстаивание суспензии оборотной воды, образующейся в процессе обогащения кимберлитовых руд, позволяет выделить твердую фазу с содержанием сапонита до 85%.

2. Фазово-структурная гетерогенность выделенных образцов сапонитсодержащего материала характеризуется наличием аморфной фазы, причем количественно данная фаза сохраняет стабильность для порошков, полученных механическим помолом.

3. Процесс структурных изменений сапонита заключается в синтезе из активных оксидных соединений, образующихся в процессе разрушения кристаллической решетки при получении порошковых материалов методом механического помола, минералов группы серпентина.

4. В качестве информационного параметра, позволяющего получать количественную характеристику данного синтеза, может быть использована величина теплового эффекта модификации сапонита при температуре 820°C.

Список литературы

1. Апанская Д.Е., Сухих П.Н., Карпюк Л.Ю., Бородин Д.О., Еромасов Р.Г., Васильева М.Н., Никифорова Э.М. Расширение сырьевой базы производства эффективных керамических строительных материалов // *Фундаментальные исследования*. 2018. № 12–2. С. 197–202.
2. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года: утв. Президентом Рос. Федерации 30.04.2012. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129117 (дата обращения: 11.04.2022).
3. Шпилева (Вержак) Д.В., Гаранин К.В. Алмазные месторождения Архангельской области и экологические проблемы их освоения // *Вестник Московского университета. Сер. 4, Геология*. 2005. № 6. С. 18–26.
4. Тутыгин А.С., Шинкарук А.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Махова Т.А. Осветление сапонитосодержащей суспензии методом электронной коагуляции // *Вода: химия и экология*. 2013. № 5. С. 93–99.
5. Посухова Т.В., Дорофеев С.А., Гаранин К.В., Гао С. Отходы алмазодобывающей промышленности: минеральный состав и способы утилизации // *Вестник Московского университета. Сер. 4, Геология*. 2013. № 2. С. 38–48.
6. Viani A., Gualtieri A., Artioli G. The nature of disorder in montmorillonite by simulation of X-ray powder patterns // *American Mineralogist*. 2002. Vol. 87, pp. 966–975. <https://doi.org/10.2138/am-2002-0720>
7. Худякова Л.И. Использование отходов горнодобывающей промышленности в производстве строительных материалов // *XXI век. Техносферная безопасность*. 2017. Т. 2. № 2. С. 45–56.
8. Морозова М.В., Айзенштадт А.М., Махова Т.А. Применение сапонитосодержащего материала для получения морозостойких бетонов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 1. С. 28–31.
9. Дроздук Т. А., Айзенштадт А. М., Тутыгин А. С., Фролова М. А. Неорганическое связующее для минеральной теплоизоляции // *Строительные материалы*. 2015. № 5. С. 86–89.
10. Drozdyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A. Effect of thermal modification of saponite-containing material on energy properties of its surface // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1400. 077053. DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077056
11. Зырянова В.Н., Бердов Г.И. Магнезиальные вяжущие вещества из отходов брусита // *Строительные материалы*. 2006. № 4. С. 61–64.
12. Коцупало Н.П., Рябцев А.Д., Зырянова В.Н., Бердов Г.И., Верещагин В.И. Магнезиальные вяжущие материалы из природных высокоминерализованных поликомпонентных рассолов // *Химия и химическая технология*. 2009. Т. 11. № 2. С. 65–72.

References

1. Apanskaya D.E., Sukhikh P.N., Karpyuk L.Y., Borodin D.O., Eromasov R.G., Vasilyeva M.N., Nikiforova E.M. Expansion of the raw material base for the production of effective ceramic building materials. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2018. No. 12–2, pp. 197–202. (In Russian).
2. Fundamentals of the state policy in the field of environmental development of the Russian Federation for the period up to 2030: approved President RF of 30.04.2012. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129117 (date of appeal: 11.04.2022). (In Russian).
3. Shpilevaya (Verzhak) D.V., Garanin K.V. Diamond deposits of the Arkhangelsk region and environmental problems of their development *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya*. 2005. No. 6, pp. 18–26. (In Russian).
4. Tutygin A.S., Shinkaruk A.A., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Makhova T.A. Clarification of saponite-containing suspension by electronic coagulation. *Voda: himiya i jekologiya*. 2013. No. 5, pp. 93–99. (In Russian).
5. Posukhova T.V., Dorofeev S.A., Garanin K.V., Gao S. Waste of the diamond mining industry: mineral composition and methods of utilization *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya*. 2013. No. 2, pp. 38–48. (In Russian).
6. Viani A., Gualtieri A., Artioli G. The nature of disorder in montmorillonite by simulation of X-ray powder patterns. *American Mineralogist*. 2002. Vol. 87, pp. 966–975. <https://doi.org/10.2138/am-2002-0720>
7. Khudyakova L.I. Use of mining waste in the production of building materials. *XXI vek. Tehnosfernaya bezopasnost'*. 2017. Vol. 2. No. 2, pp. 45–56. (In Russian).
8. Morozova M.V., Ayzenshtadt A.M., Makhova T.A. Application of saponite-containing material for production of frost-resistant concretes. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015. No. 1, pp. 28–31. (In Russian).
9. Drozdyuk T. A., Ayzenshtadt A. M., Tutygin A. S., Frolova M. A. Inorganic binder for mineral insulation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 5, pp. 86–89. (In Russian).
10. Drozdyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A. Effect of thermal modification of saponite-containing material on energy properties of its surface. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1400. 077053. DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077056
11. Zyryanova V.N., Berdov G.I. Magnesia binders from brucite waste. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 4, pp. 61–64. (In Russian).
12. Kotsupalo N.P., Ryabtsev A.D., Zyryanova V.N., Berdov G.I., Vereshchagin V.I. Magnesia binding materials from natural highly mineralized polycomponent brines. *Himiya i himicheskaya tehnologiya*. 2009. Vol. 11. No. 2, pp. 65–72. (In Russian).
13. Averina G.F., Chernykh T.N., Orlov A.A., Kramar L. Ya. Revealing possibilities to use magnesia wastes of

13. Аверина Г.Ф., Черных Т.Н., Орлов А.А., Крамар Л.Я. Выявление возможности использования магнезиальных отходов ГОК для производства вяжущих // *Строительные материалы*. 2017. № 5. С. 86–89.
14. Кошелев В.А., Аверина Г.Ф., Зимич В.В., Крамар Л.Я. Разработка составов магнезиального пенобетона, модифицированного кристаллическими затравками // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Строительство и архитектура*. 2018. Т. 18. № 4. С. 65–70.
15. Крамар Л.Я. Влияние примесей на особенности обжига высокомагнезиальных пород с целью получения строительного магнезиального вяжущего // *Цемент и его применение*. 2007. № 3–4. С. 86–89.
16. Бердов Г.И., Зырянова В.Н., Машкин А.Н., Хританков В.Ф. Нанопроцессы в технологии строительных материалов // *Строительные материалы*. 2008. № 7. С. 2–6.
17. Строкова В.В., Нелюбова В.В., Алтынник Н.И., Жерновской И.В., Осадчий Е.Г. Фазообразование в системе «цемент – известь – кремнезем» в гидротермальных условиях с использованием наноструктурированного модификатора // *Строительные материалы*. 2013. № 9. С. 30–32.
18. Морозова М.В. Активность поверхности высокодисперсных систем на основе сапонитсодержащего отхода алмазодобывающей промышленности // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 2. С. 5–11.
19. Дроздук Т.А., Айзенштадт А.М., Королев Е.В. Высокотемпературная модификация сапонитсодержащего материала // *Строительные материалы*. 2021. № 11. С. 30–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-30-35>.
20. Козару Т.В. Форстеритовая керамика на основе природных кальциймагневых силикатов // *Конструкции из композиционных материалов*. 2006. № 4. С. 107–109.
21. Тutyгин А.С., Айзенштадт А.М., Шинкарук А.А. Выделение сапонитсодержащего материала из отходов горнодобывающей промышленности // *Прикладная наука*. 2012. № 2 (33). С. 82–83.
22. Тutyгин А.С., Айзенштадт М.А., Айзенштадт А.М., Махова Т.А. Влияние природы электролита на процесс коагуляции сапонитсодержащей суспензии // *Геоэкология*. 2012. № 5. С. 379–383.
23. Вешнякова Л.А., Айзенштадт А.М. Оптимизация гранулометрического состава смесей для получения мелкозернистых бетонов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 10. С. 19–22.
24. Запольский А.К., Коган А.А. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды: свойства. Получение. Применение. Л.: Химия, 1987. 208 с.
25. Ховаков Г.С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972. 307 с.
26. Третьяков Ю.Д. Твердофазные реакции. М.: Химия, 1978. 360 с.
- mineral processing plant for manufacturing binders. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 5, pp. 86–89. (In Russian)
14. Koshelev V.A., Averina G.F., Zimich V.V., Kramar L.Ya. Development of compositions of magnesia foam concrete modified with crystalline seeds. *Vestnik of the South Ural State University. Series: Building and architecture*. 2018. Vol. 18. No. 4, pp. 65–70. (In Russian).
15. Kramar L.Ya. The influence of impurities on the features of firing high-magnesia rocks in order to obtain a construction magnesia binder. *Cement i ego primeneniye*. 2007. No. 3–4, pp. 86–89. (In Russian).
16. Berdov G.I., Zyryanova V.N., Mashkin A.N., Khritankov V.F. Nanoprocesses in construction materials technology *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 7, pp. 2–6. (In Russian).
17. Strokovaya V.V., Nelyubova V.V., Altynnik N.I., Zhernovskaya I.V., Osadchiy E.G. Phase formation in the cement-lime-silica system under hydrothermal conditions using a nanostructured modifier. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 9, pp. 30–32. (In Russian).
18. Morozova M.V. Surface activity of highly dispersed systems based on saponite-containing waste from the diamond mining industry. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 2, pp. 5–11. (In Russian).
19. Drozdnyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Korolev E.V. High-temperature modification of saponite-containing material. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 11, pp. 30–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-30-35>. (In Russian).
20. Kozaru T.V. Forsterite ceramics based on natural calcium magnesium silicates. *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov*. 2006. No. 4, pp. 107–109. (In Russian).
21. Tutygin A.S., Ayzenshtadt A.M., Shinkaruk A.A. Isolation of saponite-containing material from mining waste. *Prikladnaya nauka*. 2012. No. 2 (33), pp. 82–83. (In Russian).
22. Tutygin A.S., Aizenshtadt M.A., Aizenshtadt A.M., Makhova T.A. Influence of the nature of the electrolyte on the process of coagulation of a saponite-containing suspension *Geoekologiya*. 2012. No. 5, pp. 379–383. (In Russian).
23. Veshnyakova L.A., Aizenshtadt A.M. Optimization of the granulometric composition of mixtures for obtaining fine-grained concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2012. No. 10, pp. 19–22. (In Russian).
24. Zapolsky A.K., Kogan A.A. Koagulyanty i flokuljanty v processah ochistki vody: svojstva. Poluchenie. Primenenie [Coagulants and flocculants in water purification processes: properties. Receipt. Application]. Leningrad: Chemistry. 1987. 208 p.
25. Khovakov G.S. Fizika izmel'cheniya [Physics of grinding]. Moscow: Nauka. 1972. 307 p.
26. Tretyakov Yu.D. Tverdofaznyye reaktsii [Solid state reactions]. Moscow: Chemistry. 1978. 360 p.

УДК 622.245.422.2

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-39-49>

В.С. ЛЕСОВИК^{1,2}, д-р техн. наук, член-корр. РААСН (naukavs@mail.ru);
 Р.С. ФЕДЮК³, канд. техн. наук (roman44@yandex.ru), Ю.Л. ЛИСЕЙЦЕВ³, инженер,
 И.И. ПАНАРИН³, начальник военной кафедры Факультета военного обучения;
 В.В. ВОРОНОВ¹, канд. техн. наук

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

² Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (ЦНИИП Минстроя России) (119331, г. Москва, пр-т Вернадского, 29)

³ Дальневосточный федеральный университет (690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10)

Влияние состава на свойства и строение модифицированных цементных композитов

Развитие цивилизации приводит к возрастанию нагрузок на здания и сооружения. Проектирование материалов для них возможно осуществить лишь с позиции трансдисциплинарного подхода с учетом современных достижений геоники (геомиметики) путем управления процессами структурообразования. Разработаны цементные композиты на модифицированном полиминеральном вяжущем с применением обогащенных алюмосиликатов, полученных из гидроудаленных золошлаковых смесей, а также гидротермального нанокремнезема в двух видах (золя и нанопорошка). Разработана технология извлечения алюмосиликатов из гидроудаленной золошлаковой смеси, которая включает в себя пять стадий: дезинтеграцию, флотацию, двухступенчатую магнитную сепарацию и сушку. Микроструктурный анализ с применением сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа и энергодисперсионной спектроскопии показал, что модифицированный цементный камень имеет более плотную структуру с большим количеством низкоосновных гидросиликатов кальция, тогда как в неаддитивной цементной матрице больше высокощелочных гидросиликатов и присутствуют гексагональные пластины портландита.

Ключевые слова: наномодификатор, гидротермальный кремнезем, микроструктура, рентгенофазовый анализ, сканирующая электронная микроскопия.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> и правительства Белгородской области. Соглашение № 3 от 24.03.2022.

Для цитирования: Лесовик В.С., Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л., Панарин И.И., Воронов В.В. Влияние состава на свойства и строение модифицированных цементных композитов // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 39–49.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-39-49>

V.S. LESOVIK^{1,2}, Doctor of Sciences (Engineering), Corresponding Member of RAACS;

R.S. FEDYUK³, Candidate of Sciences (Engineering) (roman44@yandex.ru), Ju.L. LISEJCEV³, Engineer,

I.I. PANARIN³, Head of the Military Department of the Faculty of Military Training; V.V. VORONOV¹, Candidate of Sciences (Engineering)

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

² Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Utilities of the Russian Federation (29, Vernadskogo Avenue, Moscow, 119331, Russian Federation)

³ Far Eastern Federal University (10, Ajax, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation)

Influence of Composition on the Properties and Structure of Modified Cement Composites

The development of civilization leads to an increase in the loads on buildings and structures. The design of materials for is possible to carry out only from the standpoint of a transdisciplinary approach, taking into account the modern achievements of geonics (geomimetics) by controlling the processes of structure formation. Cement composites based on a modified polymineral binder have been developed using enriched aluminosilicates obtained from hydraulically removed ash and slag mixtures, as well as hydrothermal nanosilicon in two types (sol and nanopowder). A technology has been developed for extracting aluminosilicates from a hydraulically removed ash and slag mixture, which includes five stages: disintegration, flotation, two-stage magnetic separation and drying. Microstructural analysis using scanning electron microscopy, X-ray phase analysis and energy dispersive spectroscopy showed that the modified cement stone has a denser structure with a large amount of low-basic calcium hydrosilicates, while in the non-additive cement matrix there are more high-alkaline hydrosilicates and hexagonal portlandite plates are present.

Keywords: nanomodifier, hydrothermal silica, microstructure, X-ray phase analysis, scanning electron microscopy.

The study was carried out at the expense of the RGNF grant No. 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> and the Government of the Belgorod Region, Agreement No. 3 of 03/24/2022.

For citation: Lesovik V.S., Fedyuk R.S., Lisejcev Ju.L., Panarin I.I., Voronov V.V. Influence of composition on the properties and structure of modified cement composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 39–49. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-39-49>

Развитие цивилизации приводит к возрастанию нагрузок на здания, сооружения и объекты различного назначения. Для этих сооружений необходимы покрытия из эффективных строительных композитов с высокими значениями физико-механических свойств

и эксплуатационных характеристик, которые напрямую связаны с микроструктурой материала [1–3].

Таким образом, представляется актуальной разработка перспективных модифицированных вяжущих с использованием местного природного кремне-

земсодержащего сырья и техногенных алюмосиликатных ресурсов для повышения эффективности бетонов на их основе.

В представленной работе объектом исследования явились модифицированные цементные композиционные материалы для зданий и сооружений.

Научно обоснованные способы регулирования процессов структурообразования в полиминеральных твердеющих системах рассматриваются в работе в качестве предмета исследования, соответствующего фундаментальному применению возможностей тонкодисперсных многокомпонентных смесей с использованием природного и техногенного сырья. Предмет исследования коррелирует с современной идеей, представляющей совокупность задач проектирования и эксплуатации композиционных материалов, не учитываемых в классических подходах при производстве материалов и строительных изделий из стандартных цементных бетонов [4–10].

Самыми эффективными материалами для особо ответственных сооружений являются цементные бетоны, в том числе с применением в своем составе различных техногенных ресурсов [11–15].

Широко исследовано применение различных переработанных техногенных отходов при производстве композиционных вяжущих. В частности, в БГТУ им. В.Г. Шухова исследовались различные составы вяжущих низкой водопотребности с применением полиминерального сырья [16–17]. Хорошие результаты получены по применению различных топливных зол в качестве компонентов строительных материалов [18].

Научная школа Санкт-Петербургского государственного политехнического университета им. Петра Великого под руководством Н.И. Ватина [19] доказывает, что можно в качестве пуццолановых добавок применять не только высокоактивные золы-уноса и менее активные золошлаковые смеси, пролежавшие несколько лет в золоотвалах.

Научная школа ИжГТУ им. М.Т. Калашникова применяла метакраин в качестве структурирующей добавки в цементных композитах [20].

Перспективным направлением повышения качества цементных композитов является их наномодифицирование кремнеземами. Зарубежные исследователи достигали высоких результатов прочностных свойств и характеристик долговечности бетонов различного назначения при модифицировании различными техногенными нанокремнеземами [21–25]. Хорошие результаты получены В.В. Потаповым при применении гидротермального нано-SiO₂ [26–28]. Большой вклад в оценку экологической безопасности наномодификаторов для цементных материалов внесла научная школа Брянского государственного инженерно-технического университета [29].

На рис. 1 показан размерный интервал и удельная поверхность составляющих цементных композитов, что позволяет определить области использования материалов для производства нанобетона [30].

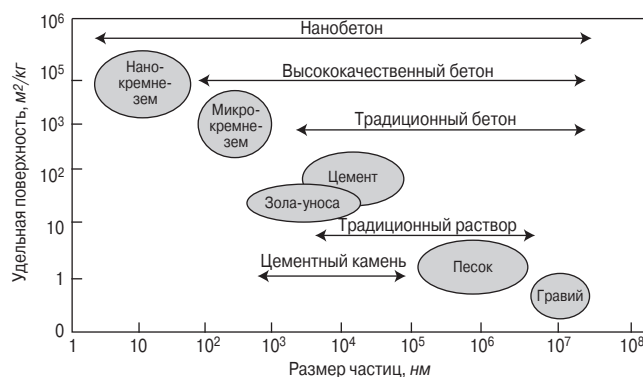


Рис. 1. Размерный интервал и удельная поверхность составляющих цементных композитов

Fig. 1. Dimensional range and specific surface of the constituent cement composites

На основании литературного обзора выдвигается гипотеза о возможности повышения физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик цементных композитов за счет совместного применения алюмосиликатов и гидротермального нанокремнезема.

Цель работы: микроструктурный анализ модифицированных цементных композитов.

Материалы и методы

В качестве сырьевых материалов применялись:

а) для модифицированного композиционного вяжущего (КВ):

– портландцемент ЦЕМ I 32,5Б – выбран благодаря своей низкой стоимости и широкому распространению среди отечественных строительных предприятий;

– алюмосиликатный компонент (А), полученный путем пятистадийной переработки золошлаковой смеси, – гидротермальный нанокремнезем в форме золя с содержанием SiO₂ 480 г/дм³, а также нанопорошка;

б) для бетонной смеси: поликарбоксилатный суперпластификатор Master Glenium (СП) 115 (BASF, Германия);

– кварцевый песок Раздольненского месторождения (Приморский край).

Исследование морфологических особенностей микроструктуры проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA3 с возможностью проводить энергодисперсионную спектроскопию (ЭДС).

Изучение качественного и количественного состава и свойств исходных материалов, композиционного вяжущего и бетонных образцов было проведено с использованием стандартных методов рентгенофазового анализа. Исследование минерального состава и структуры проведено с помощью рентгенофазового анализа на порошковом рентгеновском дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker AXS. Рентгеноструктурные исследования были проведены на порошкообразных образцах. Рентгенограммы сырья и затвердевших композитов были измерены для исследования

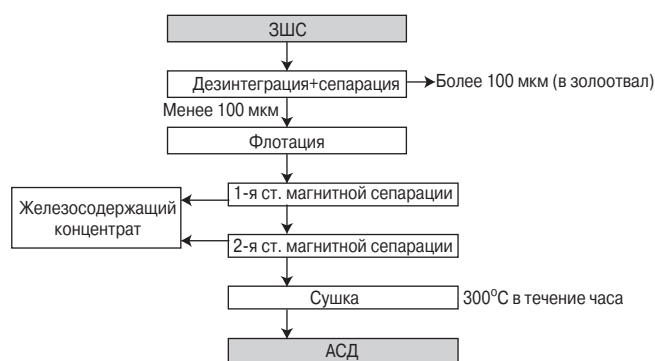


Рис. 2. Пятистадийная технология переработки золошлаковой смеси (ЗШС) в алюмосиликаты (АСД)

Fig. 2. Five-stage technology for processing ash and slag mixture (ASM) to aluminosilicates (A)

составляющих элементов и выявления возможных новых продуктов реакции.

При этом репрезентативность выборки количества образцов и набора необходимых испытаний осуществлялась с современных позиций, опубликованных в работе [31].

Результаты и дискуссия

Для управления структурообразованием цементного композита необходимо применение новых компонентов. При этом перспектива использования компонентов повышается, если они извлекаются из техногенных отходов. Большой потенциал имеют алюмосиликаты, выделенные из золошлаковых отходов гидроудаления. Авторская технология извлечения алюмосиликатов включает в себя пять стадий: дезинтеграцию, флотацию, двухступенчатую магнитную сепарацию и сушку (рис. 2).

С применением данного алюмосиликатного сырья в качестве компонента вяжущего достигается значительная экономия цемента (до 40%), что является современным трендом на пути создания «зеленых» композитов.

Разработанная алюмосиликатная добавка по своей granulometрии, химическому и минеральному составу имеет значительный потенциал для применения в качестве активного компонента полиминерального вяжущего (рис. 3).

Измельчение осуществлялось в вариопланетарной мельнице до 550 м²/кг, где совместным действием высокой ударной энергии, сильного трения и центробежных усилий достигается максимальная механоактивация вяжущего.

Разработана широкая номенклатура мелкозернистых бетонов на композиционном вяжущем (табл. 1).

Микроструктурный анализ показал, что модифицированный цементный камень имеет более плотную структуру (рис. 4, б) с большим количеством низкоосновных гидросиликатов кальция, тогда как в неаддитивной цементной матрице больше высокощелочных гидросиликатов и присутствуют гексагональные пластины портландита (рис. 4, а). Эти различия в структуре можно объяснить:

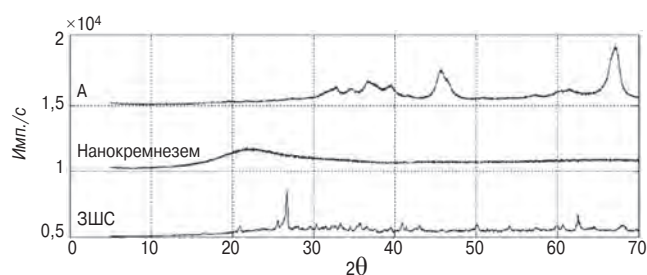


Рис. 3. Сравнение РФА спектров сырья для композиционного вяжущего
Fig. 3. Comparison of XRD spectra of raw materials for composite binder

Таблица 1
Table 1

Пропорции модифицированных составов
Proportions of modified formulations

№ состава*	Цемент	А	SiO ₂ **	Вода	СП	Песок
Ref-1	100	–	–	40	–	300
Ref-1-1	100	–	–	40	1,1	300
Ref-2	70	30	–	40	1,1	300
001SA	69,99	30	0,086 0,01 0,08	39,72	0,33	300
005SA	69,95	30	0,43 0,05 0,4	39,42	0,36	300
01SA	69,9	30	0,86 0,1 0,8	39,01	0,4	300
025SA	69,75	30	2,15 0,25 2	37,55	0,7	300
05SA	69,5	30	4,3 0,5 4	35,22	0,9	300
1SA	69	30	8,6 1 8	31,74	1,1	300
2SA	68	30	17,2 2 16	23,87	1,55	300
3SA	67	30	25,8 3 24	15,88	2,2	300
2SAC	68	30	17,2 2 16	23,87	1,55	300
3SAC	67	30	25,8 3 24	15,88	2,2	300
001PA	69,99	30	0,01	39,8	0,33	300
005PA	69,95	30	0,05	39,42	0,36	300
01PA	69,9	30	0,1	39,01	0,4	300
025PA	69,75	30	0,25	37,55	0,7	300
05PA	69,5	30	0,5	35,22	0,9	300
1PA	69	30	1	39,34	1,1	300
2PA	68	30	2	39,07	1,55	300
3PA	67	30	3	38,68	2,2	300
2PAC	68	30	2	39,07	1,55	300
3PAC	67	30	3	38,68	2,2	300

Окончание табл. 1
The Ending Table 1

№ состава*	Цемент	A	SiO ₂ **	Вода	СП	Песок
1LC	79	–	$\frac{0,086}{0,01}$ 0,08	23,74	1,1	300
2LC	78	–	$\frac{8,6}{1}$ 8	15,87	1,55	300
3LC	77	–	$\frac{17,2}{2}$ 16	7,88	2,2	300
4LC	68	–	$\frac{25,8}{3}$ 24	11,87	1,55	300

Примечания:

*LC – малоцементный (low cement); SA – золь+АСД (sol + aluminosilicate); PA – нанопорошок+АСД (powder + aluminosilicate); SAC и PAC – комплексная добавка SiO₂ + СП (complex).

**Для составов типа SA и LC в столбце SiO₂: в первой строке указан расход золя (кг); во второй – расход твердых наночастиц SiO₂ в составе золя (кг); в третьей – расход золя (л).

– вкладом пуццолановой реакции между частицами алюмосиликатов и нано-SiO₂ с Ca(OH)₂, образующимся при гидратации алита, с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция второй генерации;

– появлением дополнительных центров кристаллизации частиц гидросиликата кальция за счет большой удельной поверхности наночастиц SiO₂ и соответственно уменьшения конечного размера частиц гидросиликата кальция и увеличения степени их полимеризации и объемной плотности их упаковки;

– дополнительным фактором может быть роль наночастиц SiO₂ в качестве микронаполнителя в мезо- и макропорах цементной матрицы. Повышение прочности при сжатии, уменьшение объема, среднего диаметра пор и увеличение равномерности распределения диаметра пор происходят за счет изменения модифицированной структуры.

В контрольном образце (рис. 4, а) пустоты между частицами цемента были заняты продуктами гидра-

тации после твердения в течение 28 сут, но наблюдалось множество связанных капиллярных пор.

При использовании нанокремнезема (рис. 4, б) наблюдались более плотные образования продуктов гидратации, чем в контрольном составе. Заметно, что плотность упаковки кристаллогидратов значительно улучшается, блокируя связные поры.

Очевидно, что это будет полезно для улучшения непроницаемости и долговечности затвердевших материалов на основе цемента.

Применение разработанного композиционного вяжущего позволяет уплотнить структуру твердеющего композита, добиться появления явно различных систем новообразований игольчатого и пластинчатого вида, которые плотно заполняют изометричные и анизометричные поры. Таким образом, осуществляется управляемое структурообразование жесткой матрицы с уменьшенной пористостью, а это соответственно влечет за собой упрочнение композита.

Результаты РФА для цементных матриц в различные сроки твердения, представленные на рис. 5, показывают, что применение наномодификатора изменяет фазовую структуру твердеющего композита не качественно, а в основном количественно. Режим трансформации микроструктуры во времени похож для всех серий. С каждым последующим днем наблюдения пики Ca(OH)₂ снижаются, что свидетельствует о его связывании в гидросиликаты кальция второй генерации. Соединения портландита образуются одними из первых сразу после затворения вяжущего водой, в результате чего уже с первых суток появляются два основных пика, характеризующих Ca(OH)₂ (d=4,90; 2,63 Å). При анализе результаты РФА наибольшее содержание Ca(OH)₂ наблюдалось через 14 сут твердения, после чего его количество оставалось постоянным. Отчетливый пик этtringита (d=9,72; 5,61 Å) виден только с 7-х сут гидратации, что, вероятно, связано с замедленным формированием вторичной формы этой фазы.

В ходе анализа результатов РФА отмечено влияние наномодификатора на процесс образования отдельных вяжущих фаз в количественном выражении. Например, количество Ca(OH)₂ уменьшалось с увеличением содержания нанокремнезема. Анализ основного пика Ca(OH)₂ показал, что его количество в образцах 001SA, 1SA, 2SA и 3SA было меньше примерно на 6,4; 12; 39,3 и 42,3% соответственно по сравнению с контрольным образцом Ref-1. Кроме того, меняется взаимное соотношение пиков, ответственных за появление портландита, что может свидетельствовать об изменении морфологии кристаллической структуры, т. е. образующиеся кристаллы портландита

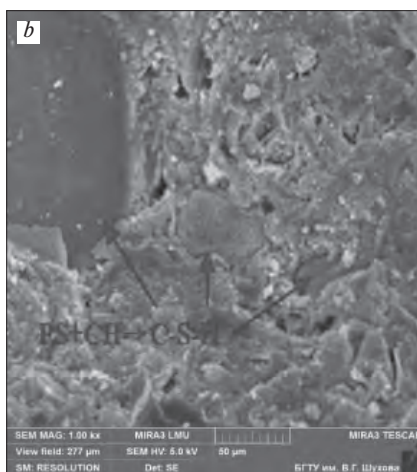
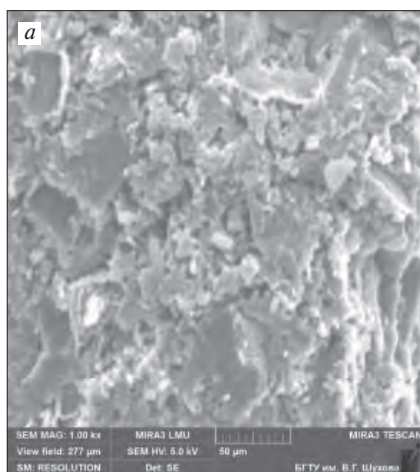


Рис. 4. Микроструктура образцов: а – контрольный состав Ref-1; б – образец 2PAC
Fig. 4. Sample microstructure: a – reference composition Ref-1; b – sample 2PAC

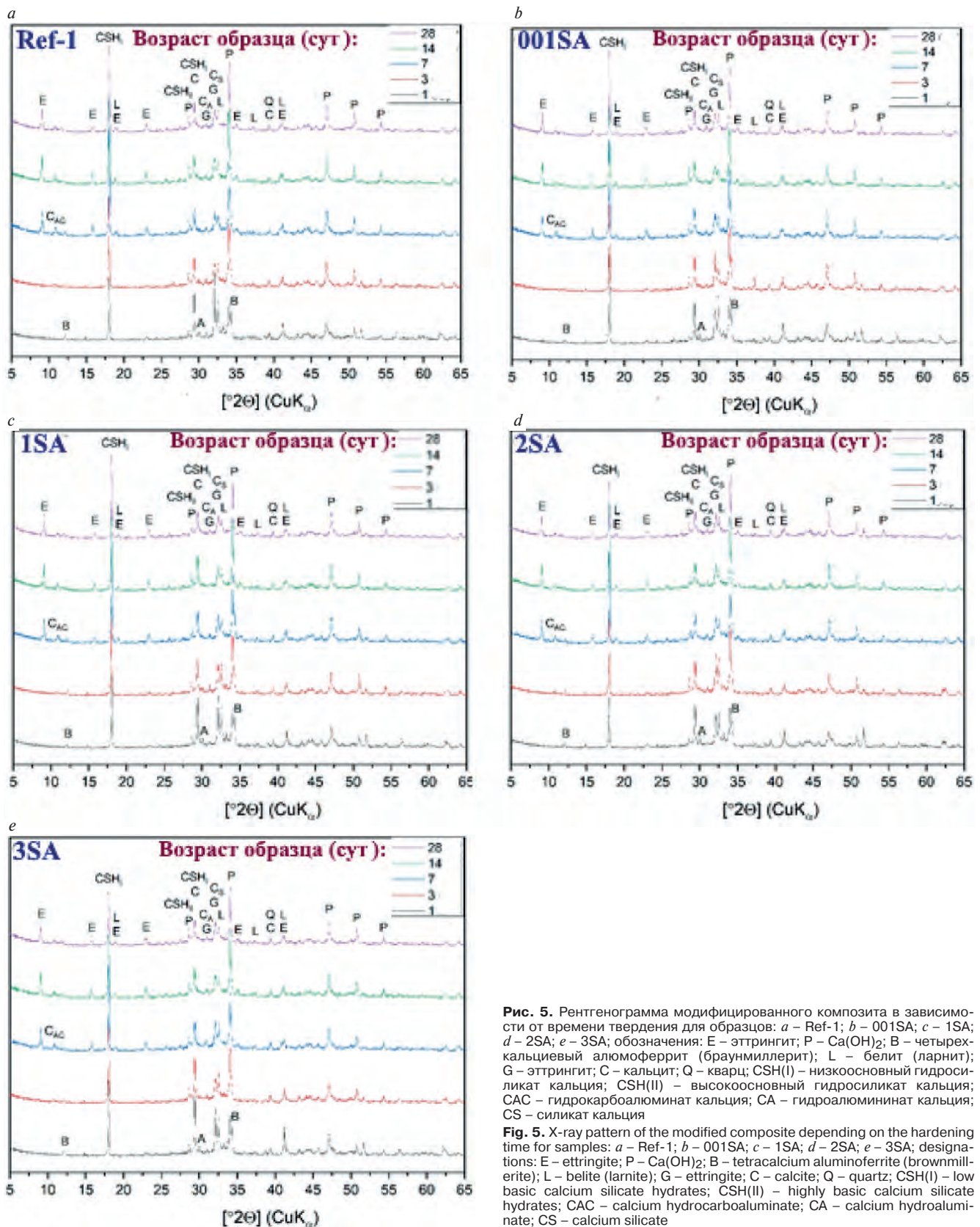


Рис. 5. Рентгенограмма модифицированного композита в зависимости от времени твердения для образцов: *a* – Ref-1; *b* – 001SA; *c* – 1SA; *d* – 2SA; *e* – 3SA; обозначения: E – этtringит; P – Ca(OH)₂; B – четырехкальциевый алюмоферрит (браунмиллерит); L – белит (ларнит); G – этtringит; C – кальцит; Q – кварц; CSH(I) – низкоосновный гидросиликат кальция; CSH(II) – высокоосновный гидросиликат кальция; CAC – гидрокарбоалюминат кальция; CA – гидроалюминат кальция; CS – силикат кальция

Fig. 5. X-ray pattern of the modified composite depending on the hardening time for samples: *a* – Ref-1; *b* – 001SA; *c* – 1SA; *d* – 2SA; *e* – 3SA; designations: E – ettringite; P – Ca(OH)₂; B – tetracalcium aluminoferrite (brownmillerite); L – belite (larnite); G – ettringite; C – calcite; Q – quartz; CSH(I) – low basic calcium silicate hydrates; CSH(II) – highly basic calcium silicate hydrates; CAC – calcium hydrocarboaluminate; CA – calcium hydroaluminate; CS – calcium silicate

характеризуются меньшими размерами и иной формой с увеличением количества нано-SiO₂. Присутствующие в структуре матрицы дополнительные ионы кремнезема, поступающие из наномодифика-

тора, интенсифицируют процесс формирования компактного геля кремнезема в результате адсорбции ионов Ca²⁺ из раствора за счет образования кристаллов портландита. При этом содержание

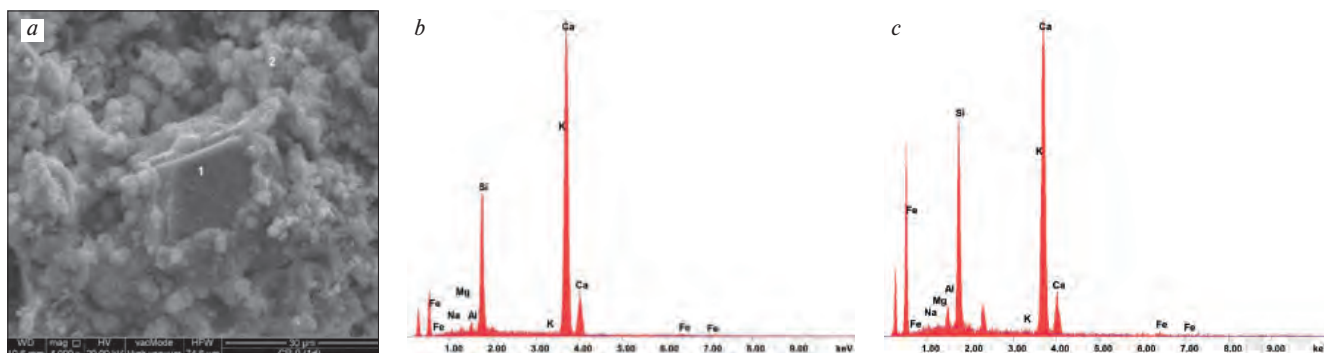


Рис. 6. Микроструктура контрольного образца Ref-1 (1-е сут): *a* – микрофотография; *b* – ЭДС спектр в точке 1; *c* – ЭДС спектр в точке 2
Fig. 6. Microstructure of the control sample Ref-1 (1st day): *a* – micrograph; *b* – EDS in point 1; *c* – EDS in point 2

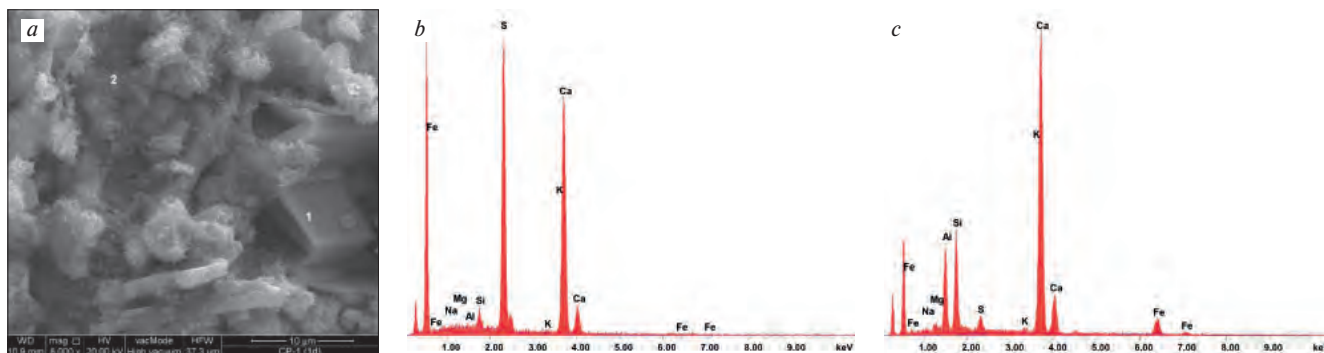


Рис. 7. Микроструктура контрольного образца 1SA (1-е сут): *a* – микрофотография; *b* – ЭДС спектр в точке 1; *c* – ЭДС спектр в точке 2
Fig. 7. Microstructure of the control sample 1SA (1st day): *a* – micrograph; *b* – EDS in point 1; *c* – EDS in point 2

фаз AFt и AFm уменьшается с увеличением содержания нанокремнезема. Судя по наблюдению за изменением основного пика этtringита, его количество в образцах 001SA, 1SA, 2SA и 3SA уменьшается в среднем на 3,4; 2,8; 8,4 и 15,7 % по сравнению с Ref-1.

Наномодификатор существенно повлиял на микроструктуру образцов. На рис. 6 показана микроструктура контрольного образца после первых суток твердения. Отчетливо видны зерна цемента на начальной стадии гидратации (1). Структура матрицы в основном заполнена коротковолокнистой первичной формой CSH (2) и AFt-фазой. Цементный камень на начальном этапе гидратации характеризуется сильно развитой микропористостью. На этой стадии цементный камень, модифицированный нанокремнеземом, характеризуется наличием гелеобразных продуктов гидратации, образующих волокнистые формы, что в основном ответственно за увеличение ранней прочности.

Пример микроструктуры образца 001SA показан на рис. 7. Видны хорошо развитые кристаллы этtringита (1), встроенные в структуру геля и волокнистых форм гидросиликатов кальция. Отмечены также пористые формы гидратированных алюмосиликатов кальция (2) с $C/S = 2,87$.

В последующие дни твердения происходит дальнейшая гидратация зерен цемента, в результате чего происходит постепенное заполнение межзернового пространства продуктами гидратации. AFt, реагируя с C_3A , образует гексагональные кристаллы AFm. На рис. 8, показывающем микроструктуру образца

001SA через 3 сут твердения, видны преимущественно аморфные формы гидросиликатов кальция в виде компактного геля (1). Также видны хорошо сформированные игольчатые кристаллы этtringита (2) на слое уплотненных форм гидратированных силикатов кальция и алюмосиликатов ($C/S=2,31$). В структуре цементной матрицы модифицированного золем нанокремнезема обнаруживаются тонкие гелеобразные слои CSH, расположенные на подложке из портландита (рис. 8, *d*).

После 7 сут твердения выявлено относительно высокое содержание фаз AFt и AFm по сравнению с гидратированными формами силикатов и алюмосиликатов кальция. Это видно на рис. 9, *a*, где представлена микроструктура контрольного образца Ref-1. Присутствуют очень хорошо сформированные кристаллы этtringита в виде длинных игл (1). CSH также наблюдается локально в аморфной форме (2). На этой стадии гидратации присутствие нанокремнезема сделало микроструктуру более уплотненной. Однако имеются многочисленные разрывы сплошности из-за наличия микротрещин различной степени раскрытия, как это видно у образца 2SA (рис. 9, *d*). В сочетании с макротрещинами это основная причина самых низких значений прочности после 7 сут твердения.

После двухнедельного твердения в цементной матрице, модифицированной нанокремнеземом, наблюдались многочисленные скопления крупных изометричных кристаллов гидратированного силиката кальция (1) с очень высоким содержанием

кремнезема ($C/S=1,7$) (рис. 10, *a*). Эти кристаллы состоят из нескольких или более слоев тонких пленок, плотно прилегающих друг к другу. Характерным признаком также является наличие многочисленных участков аморфной формы CSH (2) с высоким содержанием кремнезема ($C/S=1,69$). Что отличает модифицированную цементную матрицу от немодифицированной на этой стадии твердения, так это хорошо заметные частично гидратированные зерна цемента с адсорбированным слоем кремнезема на поверхности, как видно на рис. 10, *d*. Кроме того, эти зерна явно отделены от продуктов гидратации цемента, а в структуре еще присутствуют многочисленные микротрещины.

Через 28 сут твердения формируется структура цементной матрицы. Например, на рис. 11, *a* (1SA) показаны волокнистые формы моносульфата алюмината кальция (1), который кристаллизуется на подложке из продуктов разложения Aft. Характерно также наличие слоя геля CSH на кристаллах портландита (2). Контрольный образец Ref-1 характеризуется наличием крупных скоплений правильно сформированных кристаллов портландита, которые прослоены различными формами CSH, от волокнистых до аморфных (рис. 11, *d*).

По результатам, приведенным на рис. 6–11, установлено, что модификация цементной матрицы с помощью нанокремнезема привела к более низкому соотношению C/S фаз гидратированного кремнезема в каждый анализируемый период созревания. Например, для Ref-1 наблюдалось появление гидросиликатов кальция с C/S в диапазоне 1,7–3. Для 2SA наблюдались более низкие значения в диапазоне 1,5–2,5. Кроме того, отчетливо видна разница в морфологии кристаллов портландита. Использование наномодификатора привело к получению кристаллов $Ca(OH)_2$ меньшего размера и большей дисперсности в объеме матрицы. В немодифицированном контрольном образце Ref-1 наблю-

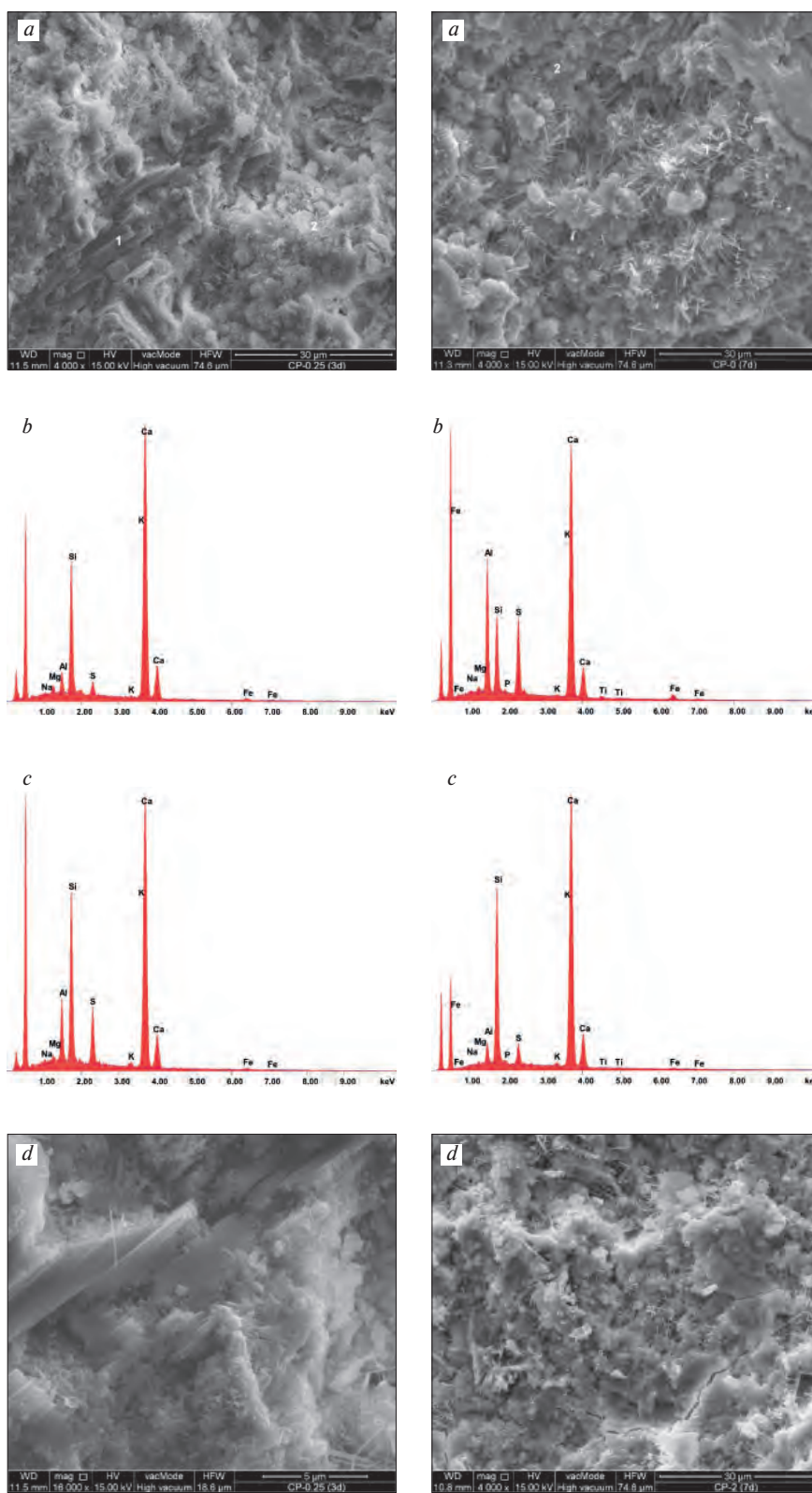


Рис. 8. Микроструктура образца 001SA (3 сут): *a* – ранние аморфные продукты гидратации; *b* – спектр ЭДС в точке 1; *c* – спектр ЭДС в точке 2; *d* – гелевая форма CSH, сформированная на портландитовой подложке

Fig. 8. Microstructure of sample 001SA (3 days): *a* – early amorphous hydration products; *b* – EDS in point 1; *c* – EDS in point 2; *d* – CSH gel formed on a portlandite substrate

Рис. 9. Микроструктура образцов Ref-1 и 2SA (7 сут): *a* – Ref-1 – крупные скопления Aft-фазы; *b* – спектр ЭДС в точке 1; *c* – спектр ЭДС в точке 3; *d* – 2SA – микротрещины в гелевой фазе CSH

Fig. 9. Microstructure of Ref-1 and 2SA samples (7 days): *a* – Ref-1 – large accumulations of the Aft phase; *b* – EDS in point 1; *c* – EDS in point 3; *d* – 2SA – microcracks in the CSH gel phase

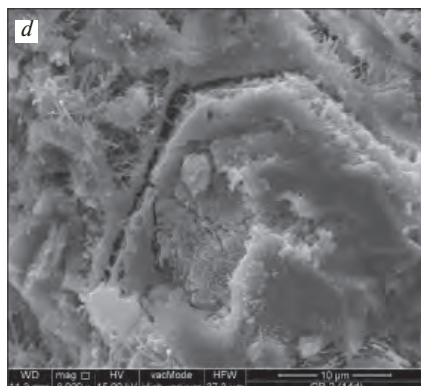
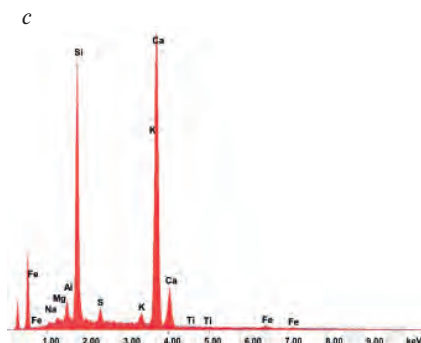
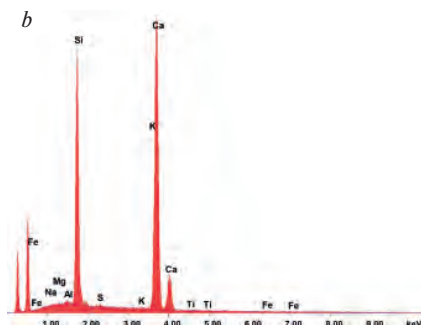
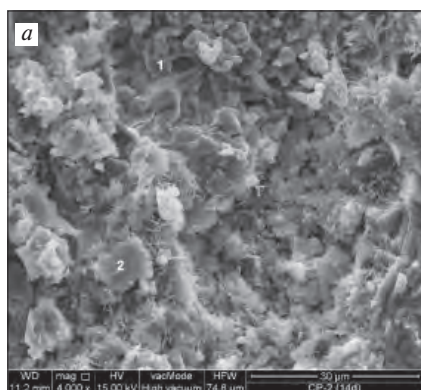


Рис. 10. Микроструктура образца 2SA (14 сут): *a* – видимые скопления изометричных кристаллов гидросиликата кальция с высоким содержанием кремнезема; *b* – спектр ЭДС в точке 1; *c* – спектр ЭДС в точке 2; *d* – частично гидратированное цементное зерно с адсорбированным кремнеземом на поверхности

Fig. 10. Microstructure of sample SA2 (14 days): *a* – visible accumulations of isometric crystals of calcium silicate hydrates with a high content of silica; *b* – EDS in point 1; *c* – EDS in point 2; *d* – partially hydrated cement grain with adsorbed silica on the surface

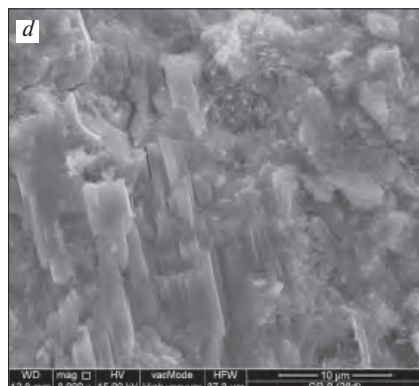
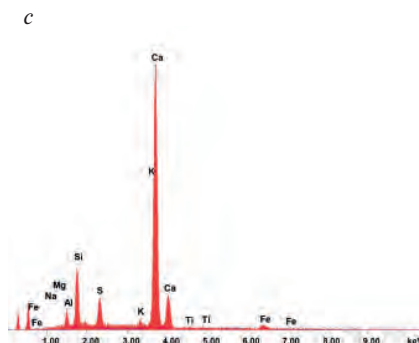
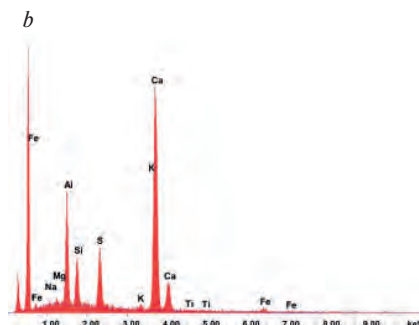
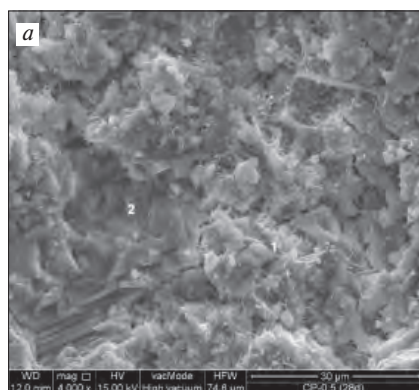


Рис. 11. Микроструктура образцов 1SA и Ref-1 (28 сут): *a* – 1SA – гидратированные формы алюмосиликатов и силикатов кальция; *b* – спектр ЭДС в точке 1; *c* – спектр ЭДС в точке 2; *d* – Ref-1 – сформированные кристаллы портландита

Fig. 11. Microstructure of samples 1SA and Ref-1 (28 days): *a* – 1SA – hydrated forms of aluminosilicates and silicates of calcium; *b* – EDS in point 1; *c* – EDS in point 2; *d* – Ref-1 – formed crystals of portlandite

дались крупные скопления кристаллов портландита.

Комплекс проведенных исследований микроструктуры новообразований выявил, что поверхность наночастиц SiO_2 создает:

1) дополнительные места для нуклеации CSH-геля, ускоряет кинетику гидратации C_3S и формирования объема CSH-геля, что приводит к снижению объема и диаметра капиллярных пор;

2) пуццолановую реакцию и дополнительный объем низкоосновных гидросиликатов кальция CSH(I);

3) повышает скорость и степень полимеризации кремнекислородных тетраэдров SiO_4 , что приводит к повышению упорядоченности структуры частиц и структуры CSH-геля, формированию фаз геля с пониженным отношением Ca/Si .

Подтверждением полученных результатов служат результаты физико-механических свойств разрабатываемых композитов (табл. 2).

Согласно результатам, приведенным в табл. 2, эффект повышения прочности при сжатии цементных модифицированных композитов возрастал при увеличении дозировки SiO_2 .

Выводы

1. Разработаны цементные композиты на модифицированном полиминеральном вяжущем с применением обогащенных алюмосиликатов, полученных из гидроудаленных золошлаковых смесей, а также гидротермального нанокремнезема в двух видах (золя и нанопорошка).

2. Разработана технология извлечения алюмосиликатов из гидроудаленной золошлаковой смеси, которая включает в себя пять стадий: дезинтеграцию, флотацию, двухступенчатую магнитную сепарацию и сушку.

3. Микроструктурный анализ показал, что модифицированный цементный камень имеет более плотную структуру (рис. 4, *b*) с большим количеством низкоосновных гидросиликатов кальция, тогда как в неаддитивной цемент-

Таблица 2
Table 2Физико-механические свойства модифицированных составов
Physical and mechanical properties of modified formulations

Свойства	Ref-1	Ref 1-1	001SA	1SA	2SA	3SA	2SAC	3SAC
Прочность при сжатии на 1-е сут, МПа	7,6	7,9	8,5 (+7,6%)	11,4 (+44,3%)	13,3 (+68,3%)	15,1 (+91,1%)	14,5 (+83,5%)	15,8 (+100%)
$\Delta R_{\text{сж}}^1/\text{SiO}_2$			760%	44,3%	34,1%	30,3%	–	–
$R_{\text{сж}}^1/R_{\text{сж}}^{28}$		0,23	0,24	0,27	0,29	0,32	–	–
Прочность при сжатии на 7-е сут, МПа	18,8	19,5	19,9 (+2%)	22,1 (+13,5%)	24,3 (+24,6%)	28,4 (+45,6%)	25,1 (+28,7%)	29,2 (+49,7%)
$\Delta R_{\text{сж}}^7/\text{SiO}_2$			200%	13,5%	12,3%	15,2%	–	–
Прочность при сжатии на 28-е сут, МПа	31,1	34	35,1 (+3%)	42 (+23,5%)	44,5 (+30,8%)	46,2 (+35,8%)	45,9 (+35%)	49,1 (+44,4%)
$\Delta R_{\text{сж}}^{28}/\text{SiO}_2$			300%	23,5%	15,4%	11,9%	17,5%	14,8%
Прочность при изгибе на 1-е сут, МПа	0,9	0,9	1 (+11,1%)	1,5 (+66,6%)	1,7 (+88,8%)	1,9 (+111,1%)	1,8 (+100%)	1,9 (+111,1%)
$\Delta R_{\text{из}}^1/\text{SiO}_2$			1110%	66,6%	44,4%	37%	–	–
$F_{\text{из}}/F_{\text{сж}}$, 1-е сут, МПа		0,11	0,11	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12
$R_{\text{из}}^1/R_{\text{из}}^{28}$		0,23	0,23	0,31	0,33	0,35	–	–
Прочность при изгибе на 7-е сут, МПа	2,1	2,2	2,2 (0%)	2,5 (+13,6%)	2,8 (+27,2%)	3,3 (+50%)	2,9 (+31,8%)	3,4 (+54,5%)
$\Delta R_{\text{из}}^7/\text{SiO}_2$			0%	13,6%	13,6%	16,6%	–	–
$F_{\text{из}}/F_{\text{сж}}$, 7-е сут		0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Прочность при изгибе на 28-е сут, МПа	3,8	3,9	4,3 (+10,2%)	4,9 (+25,6%)	5,1 (+30,7%)	5,4 (+38,4%)	5,6 (+43,5%)	5,9 (+51,2%)
$\Delta R_{\text{из}}^{28}/\text{SiO}_2$			1020%	25,6%	15,3%	12,8%	21,7%	17%
$F_{\text{из}}/F_{\text{сж}}$, 28-е сут		0,11	0,12	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12

ной матрице больше высокощелочных гидросиликатов и присутствуют гексагональные пластины портландита.

4. Результаты РФА для цементных матриц в различные сроки твердения показывают, что применение наномодификатора изменяет фазовую структуру твердеющего композита не качественно, а в основном количественно. С каждым последующим днем наблюдения пики $\text{Ca}(\text{OH})_2$ снижаются, что свидетельствует о его связывании в гидросиликаты кальция второй генерации.

5. Комплекс проведенных исследований микроструктуры новообразований выявил, что поверхность наночастиц SiO_2 создает:

– дополнительные места для нуклеации CSH-геля, ускоряет кинетику гидратации C_3S и формирования объема CSH-геля, что приводит к снижению объема и диаметра капиллярных пор;

– пуццолановую реакцию и дополнительный объем низкоосновных гидросиликатов кальция CSH(I);

– повышает скорость и степень полимеризации кремнекислородных тетраэдров SiO_4 , что приводит к повышению упорядоченности структуры частиц и структуры CSH-геля, формированию фаз геля с пониженным отношением Ca/Si .

Список литературы / References

1. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее // *Вестник МГСУ*. 2017. № 1. С. 9–16.
1. Lesovik V.S. Construction Materials. Present and future. *Vestnik MGSU*. 2017. No. 1, pp. 9–16. (In Russian).
2. Лесовик В.С., Фомина Е.В., Айзенштадт А.М. Некоторые аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 100–106. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-100-106>
2. Lesovik V.S., Fomina E.V., Ayzenshtadt A.M. Some aspects of technogenic metasomatoses in construction material science. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 100–106. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-100-106> (In Russian).
3. Ramakrishnan K., Depak S.R., Hariharan K.R., Abid S.R., Murali G., Cecchin D., Fediuk R., Mugahed Amran Y.H., Abdelgader H.S., Khatib J.M. Standard and modified falling mass impact tests on preplaced aggregate fibrous concrete and slurry infiltrated fibrous concrete. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 298. 153857. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123857>

4. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. 287 с.
4. Lesovik V.S. Geonika (geomimetika). Primery realizacii v stroitel'nom materialovedenii [Geonics (geomimetics). Examples of implementation in building materials science]. Belgorod: Publishing house of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. 287 p.
5. Баженов Ю.М., Прошин А.П., Еремкин А.И., Королев Е.В. Сверхтяжелый бетон для защиты от радиации // *Строительные материалы*. 2005. № 8. С. 6–8.
5. Bazhenov Yu.M., Proshin A.P., Yermkin A.I., Korolev Ye.V. Extra heavy concrete for radiation protection. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2005. No. 8, pp. 6–8 (In Russian).
6. Королев Е.В., Очкина Н.А., Баженов Ю.М., Прошин А.П. Радиационно-защитные свойства особотяжелых растворов на основе высокоглиноземистого цемента // *Строительные материалы*. 2006. № 4. С. 54–56.
6. Korolev Ye.V., Ochkina N.A., Bazhenov Yu.M., Proshin A.P. Radiation-protective properties of very heavy mortars based on high-alumina cement. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 4, pp. 54–56 (In Russian).
7. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н. Огнезащита строительных конструкций: современные средства и методы оптимального проектирования // *Строительные материалы*. 2002. № 6. С. 2–5.
7. Strakhov V.L., Garashchenko A.N. Fire protection of building structures: modern means and methods of optimal design. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2002. No. 6, pp. 2–5. (In Russian).
8. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. Ч. II // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 9–13.
8. Kaprielov S.S., Travush V.I., Karpenko N.I., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V. Modified high-strength concretes of B80 and B90 classes in monolithic structures. Part II. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 3, pp. 9–13 (In Russian).
9. Constantinides G., Ulm F.-J., Van Vliet K.J. On the use of nanoindentation for cementitious materials. *Materials and Structures*. 2003. Vol. 36, pp. 191–196.
10. Constantinides G., Ulm F.-J. The effect of two types of C–S–H on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling. *Cement and Concrete Research*. Vol. 2004. No. 34, pp. 67–80. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00230-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00230-8)
11. Cheng Y.T. Cheng C.M. Scaling relationships in conical indentation of elastic perfectly plastic solids. *International Journal of Solids Structures*. 1999. Vol. 36, pp. 1231–1243. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(97\)00349-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(97)00349-1)
12. Ganneau F.P., Constantinides G., Ulm F.-J. Dual-indentation technique for the assessment of strength properties of cohesive-frictional materials. *International Journal of Solids Structures*. 2006. Vol. 43, pp. 1727–1745. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.03.035>
13. Donev A., Cisse I., Sachs D., Variano E.A., Stillinger F.H., Connely R., Torquato S., Chaikin P.M. Improving the density of jammed disordered packings using ellipsoids. *Science*. 2004. Vol. 303. Iss. 5660, pp. 990–993. DOI: 10.1126/science.1093010
14. Sloane N.J.A. Kepler's conjecture confirmed. *Nature*. 1998. Vol. 395, pp. 435–436. <https://doi.org/10.1038/26609>
15. Oliver W.C. Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*. 1992. Vol. 7 (6), pp. 1564–1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
16. Гридчин А.М., Баженов Ю.М., Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Пушкаренко А.С., Василенко А.В. Строительные материалы для эксплуатации в экстремальных условиях. М.: ACB, 2008. 537 с.
16. Gridchin A.M., Bazhenov Yu.M., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.Kh., Pushkarenko A.S., Vasilenko A.V. Stroitel'nye materialy dlja ekspluatatsii v jekstremal'nyh uslovijah [Construction materials for operation in extreme conditions]. Moscow: ASV. 2008. 573 p.
17. Володченко А.А., Лесовик В.С., Чхин С. Повышение эксплуатационных характеристик стеновых материалов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2014. № 3. С. 29–34.
17. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Chkhin S. Improving the performance of wall materials. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2014. No. 3, pp. 29–34. (In Russian).
18. Strokova V.V., Markova I.Yu., Markov A.Yu., Stepanenko M.A., Nerovnaya S.V., Bondarenko D.O., Botsman L.N. Properties of a composite cement binder using fuel ashes. *Key Engineering Materials*. 2022. No. 909, pp. 184–190. <https://doi.org/10.4028/p-tm4y4j>
19. Vatin N., Barabanshchikov Y., Usanova K., Akimov S., Kalachev A., Uhanov A. Cement-based materials with oil shale fly ash additives. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. XVII-th International youth science and environmental Baltic region countries forum «Ecobaltica» 16–17 July 2020*. Saint-Petersburg. Russian Federation. 2020 Vol. 17. 012043.
20. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Пудов И.А., Полянских И.С., Саидова З.С. Об опыте применения метакеолина в качестве структурирующей добавки в цементных композитах // *Вестник ВСГУТУ*. 2021. № 2 (81). С. 58–68.
20. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Pudov I.A., Polyanskikh I.S., Saidova Z.S. On the experience of using metakaolin as a structuring additive in cement composites. *Vestnik of the ESSTU*. 2021. No. 2 (81), pp. 58–68. (In Russian).

21. Chen J.J., Sorelli L., Vandamme M., Ulm F.-J., Chanvillard G. A coupled nanoindentation/SEM-EDS study on low water/cement ratio Portland cement paste: Evidence for C–S–H/Ca(OH)₂ nanocomposites. *Journal of American Ceramic Society*. 2010. Vol. 93, pp. 1484–1493. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2009.03599.x
22. Salemi N., Behfarnia K. Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 48, pp. 934–941. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.037>
23. Adetukasi A.O., Fadugba O.G., Adebakin A.O., Adetukasi I.H., Omokungbe O. Strength characteristics of fibre-reinforced concrete containing nano-silica. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. P. 2, pp. 584–589. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.123>
24. Konkol J., Prokopski G. Fracture toughness and fracture surfaces morphology of metakaolinite-modified concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 123, pp. 638–648. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.025>
25. De Jong M.J., Ulm F.-J. The nanogranular behavior of C–S–H at elevated temperatures (up to 700 degrees C). *Cement and Concrete Research*. 2007. Vol. 37, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.09.006
26. Potapov V., Efimenko Yu., Fediuk R., Gorev D., Kozin A., Liseitsev Yu. Modification of Cement Composites with Hydrothermal Nano-SiO₂. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2021. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003964
27. Zhdanok S.A., Potapov V.V., Polonina E.N., Leonovich S.N. Modification of cement concrete by admixtures containing nanosized materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020. Vol. 93, pp. 648–652. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02163-y>
28. Potapov V., Efimenko Y., Fediuk R., Gorev D. Effect of hydrothermal nanosilica on the performances of cement concrete. *Construction and Building Materials*. 2021. 269. 121307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121307>
29. Пыкин А.А., Лукутцова Н.П. Оценка экологической безопасности наномодифицирующих добавок для строительных композитов. *Среда, окружающая человека: природная, техногенная, социальная. Материалы X Международной научно-практической конференции*. Брянск, 2021. С. 305–309.
29. Pykin A.A., Lukutsova N.P. Ecological safety assessment of nano-modifying additives for building composites. *Human environment: natural, technogenic, social. Materials of the X International Scientific and Practical Conference*. Bryansk. 2021. pp. 305–309. (In Russian).
30. Sobolev K., Ferrara M. How nanotechnology can change the concrete word-Part 1. *American Ceramic Bulletin*. 2005. Vol. 84, pp. 15–17.
31. Логанина В.И., Зайцева М.В. Репрезентативность выборки при оценке качества строительных материалов // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2022. № 1 (270). С. 67–70.
31. Loganina V.I., Zaitseva M.V. Representativeness of the sample in assessing the quality of building materials. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka*. 2022. No. 1 (270), pp. 67–70. (In Russian).

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

«Проектирование оснований, фундаментов и подземных сооружений»

Учебное и практическое пособие под редакцией чл.-корр. РААСН, д-ра техн. наук, проф. Р. А. Мангушева



Авторы: д-р техн. наук Р.А. Мангушев,

канд. техн. наук А.И. Осокин,

канд. техн. наук В.В. Конюшков,

канд. техн. наук И.П. Дьяконов,

канд. техн. наук С.В. Ланько.

Пособие выпущено под грифом рекомендации Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН).

Данное пособие является дополнением к ранее изданным базовым учебникам «Механика грунтов» (2019) и «Основания и фундаменты» (2020). Авторы д-ра техн. наук, проф. Р.А. Мангушев и И.И. Сахаров.

Разработанное пособие является не только учебным изданием, но и практическим руководством для инженеров-строителей, так как охватывает вопросы проектирования основных типов оснований, фундаментов и подземных частей гражданских зданий и сооружений. Особое внимание уделено расчетам различного типа фундаментов, изготовленным по современным отечественным и зарубежным технологиям, а также конструктивным и технологическим методам устройства котлованов. Учтены особенности устройства фундаментов высотных зданий, влияния технологических осадок, рассмотрены численные методы, используемые при геотехнических расчетах. Особенностью книги является наличие большого количества расчетных примеров по различным типам оснований и фундаментов.

Издание рекомендовано для использования при подготовке бакалавров и специалистов.

В.Н. МОРГУН¹, канд. техн. наук (vnmorgun@sfedu.ru);Л.В. МОРГУН², д-р техн. наук (konst-lvm@yandex.ru)¹ Южный федеральный университет (344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42)² Донской государственный технический университет (344001, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

Свойства пенобетонов при их дисперсном армировании полипропиленовыми и углеродными волокнами

Отражена актуальность расширения номенклатуры изделий из газонаполненных бетонов. Показано, что различия в перечне видов изделий, изготавливаемых из автоклавного газосиликата и неавтоклавного пенобетона, опираются на их индивидуальные эксплуатационные свойства, которые в равноплотных бетонах существенно различаются по трещиностойкости и прочности на растяжение при изгибе. Перечислены причины роста потребности в энергоэффективных строительных материалах. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния полипропиленовых и углеродных волокон различной длины на предельную растяжимость и начальный модуль упругости на растяжение при изгибе пенобетонов неавтоклавного твердения марки D700. Установлено, что высокомодульные углеродные волокна позволяют совершенствовать конструктивные свойства пенобетонов и принципиально не изменяют характера разрушения материала под действием изгибающих и растягивающих нагрузок. Полипропиленовая дисперсная арматура способна эффективно управлять параметрами предельной растяжимости пенобетонов и способствует существенному повышению энергоемкости их разрушения. Достигнутые результаты позволяют прогнозировать рост долговечности эксплуатации пенобетонов, дисперсно-армированных полипропиленовыми волокнами, предназначенных для применения в качестве стеновых материалов.

Ключевые слова: газосиликат, пенобетон, полипропиленовые волокна, углеродные волокна.

Для цитирования: Моргун В.Н., Моргун Л.В. Свойства пенобетонов при их дисперсном армировании полипропиленовыми и углеродными волокнами // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 50–54. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-50-54>

V.N. MORGUN¹, Candidate of Sciences (Engineering) (vnmorgun@sfedu.ru);L.V. MORGUN², Doctor of Sciences (Engineering) (konst-lvm@yandex.ru)¹ Southern Federal University (105/42, Bolshaya Sadovaya Street, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation)² Don State Technical University (1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344001, Russian Federation)

Properties of Foam Concrete During Their Dispersed Reinforcement with Synthetic and Carbon Fibers

The relevance of expanding the range of products made of gas-filled concrete is reflected. It is shown that the differences in the list of types of products made of autoclave silicate and non-autoclave foam concrete are based on their individual performance properties, which in equally dense concretes differ significantly in crack resistance and tensile strength during bending. The reasons for the growing demand for energy-efficient building materials are listed. The results of experimental studies of the effect of polypropylene and carbon fibers of various lengths on the ultimate extensibility and the initial modulus of tensile elasticity during bending of non-autoclaved foam concrete of the D700 brand are presented. It is established that high-modulus carbon fibers allow improving the structural properties of foam concrete and do not fundamentally change the nature of the destruction of the material under the action of bending and tensile loads. Polypropylene dispersed reinforcement is able to effectively control the parameters of the ultimate extensibility of foam concrete and contribute to a significant increase in the energy intensity of their destruction. The achieved results make it possible to predict an increase in the durability of operation of foam concrete dispersed reinforced with polypropylene fibers intended for use as wall materials.

Keywords: silicate gas, foam concrete, polypropylene fibers, carbon fibers.

For citation: Morgun V.N., Morgun L.V. Properties of foam concrete during their dispersed reinforcement with synthetic and carbon fibers. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 50–54. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-50-54>

Проблемы ресурсо- и энергосбережения, актуальные для капитального строительства [1, 2], определяют научный и практический интерес к совершенствованию технологий газонаполненных бетонов потому, что правильное применение именно этих материалов позволяет успешно двигаться в этом направлении. Технология автоклавного газосиликата [3], получившая интенсивное развитие во второй половине XX в. и продолжающая успешно использоваться в настоящее время, по мнению авторов, близка к своему апогею. Основанием для этого утверждения служит номенклатура выпускаемых изделий [3, 4]. Если в прошлом веке из газосиликата производили крупноразмерные железобетонные из-

делия (плиты, панели), то в настоящее время она «сжежилась» до мелкоштучных блоков.

Причиной отмеченного ограничения являются механические свойства материалов наиболее привлекательных марок (D300–D500), применяемых в качестве стеновых и изоляционных. Если по прочности при сжатии изделия из газосиликатов вполне пригодны для применения, то их трещиностойкость и прочность на растяжение оставляют желать лучшего. А именно величина прочности на растяжение регламентирует размер транспортных и монтажных потерь [5], эксплуатационную надежность строительных конструкций и ряд специфических требований к креплению инженерных сетей [6] при возведении зданий.

Постановка задачи

Абсолютное большинство несущих и ограждающих применяемых в капитальном строительстве конструкций являются железобетонными. Важнейшая причина использования в них арматурных каркасов — необходимость обеспечения эксплуатационной безопасности потому, что соотношения между прочностью на растяжение при изгибе и прочностью при сжатии [7, рис. 4] для бетонов классов В40–В60 составляют 11–9%. В ячеистых бетонах за счет пористости это соотношение может опускаться до 3–5%, поскольку регламентируется не только прочностью цементного камня, но и структурой газовой пористости.

Практическая потребность в прочных ресурсо- и энергосберегающих материалах, впервые системно обострившаяся в результате глобального энергетического кризиса конца 70-х гг. прошлого века, позволила выдающемуся ученому ЛИСИ профессору И.А. Лобанову поставить перед своими аспирантами задачу разработки технологии дисперсно-армированных газонаполненных бетонов. Пионерским шагом в направлении решения этой задачи было авторское свидетельство И.А. Лобанова и Ю.В. Пухаренко № 863545 под названием «Сырьевая смесь для получения ячеистых бетонов», выданное СССР в 1981 г. (для сравнения, аналогичная по цели и содержанию работа опубликована в США в 2013 г. [8]).

Со времени получения отечественного патента прошло более 40 лет. Прикладная наука РФ позволила практике стройиндустрии, несмотря на отсутствие государственной поддержки в связи с изменением социально-экономической государственной модели, освоить следующую номенклатуру изделий из дисперсно-армированных пенобетонов неавтоклавного твердения:

- стеновые блоки и плиты теплоизоляции плотностью от 300 до 800 кг/м³;
- галтели (погонажные изделия, предназначенные для теплоизоляции мест сопряжения оконных и дверных проемов с несущими строительными конструкциями) плотностью от 400 до 600 кг/м³;
- перемычки гражданских зданий брусковые и арочные с несущей способностью до 27,5 кН/м из фибропеножелезобетона D700 и выше;
- карнизные изделия;
- сборные блоки вентиляционных каналов.

Перечисленное разнообразие обусловлено наличием в смеси дисперсного армирования в виде волокон и, как следствие, особенности массопереноса, развивающиеся в пенобетонной смеси на этапе фазового перехода «из вязкого в твердое» [9–11] и формирующие следующие преимущества неавтоклавного дисперсно-армированного газонаполненного бетона по сравнению с равноплотным автоклавным газосиликатом:

- пониженные, но достаточные для того, чтобы стена из фибропенобетона марок D400–D500 могла дышать, паро- и влагопроницаемость;

- пониженная или управляемая усадочная деформативность;
- повышенная морозостойкость;
- возможность работы в конструкциях как пулепоглощающий материал [12];
- повышенная огнестойкость [13].

Результаты и обсуждение

Современная промышленность производит обширную номенклатуру минеральных и синтетических волокон, физические (плотность и способность поглощать влагу) и механические свойства которых (прочность, деформативность, хрупкость) являются значимыми для технологии фибропенобетонов (далее — ФПБ). А прочность и энергоемкость разрушения любого композиционного материала можно считать универсальной и комплексной характеристикой тех его свойств, которые регламентируют рациональную область применения.

В выполненных ранее работах [9–11] неоднократно отмечалось, что при содержании фибры в количестве менее 0,5% от объема цементного камня ожидать повышения устойчивости смесей и качества затвердевшего пенобетона не представляется возможным. Поэтому в ходе настоящих исследований расход фибры (синтетической или органической) составлял 1% от объема цементного камня. Соотношение между вяжущим (Ц) и заполнителем (З) составляло Ц:З=1:0,8. Были изготовлены контрольный пенобетон без фибры и дисперсно-армированный.

В качестве синтетической фибры использовали самую распространенную в настоящее время производимую ООО «Си-Айрлайн» щелочестойкую полипропиленовую фибру (ПП) со следующими свойствами:

- плотность 0,91 г/см³;
- водопоглощение 0,1%;
- модуль упругости 8000 МПа;
- прочность на растяжение 600 МПа;
- предельная растяжимость до 15%;
- длина 18 и 40 мм;
- диаметр 0,018 мм.

В качестве углеродной фибры в ходе экспериментальных исследований применяли углеродное волокно (УВ), выпускаемое ХК «Композит»:

- плотность 1,8 г/см³;
- водопоглощение 0%;
- модуль упругости 230000 МПа;
- прочность на растяжение 2950 МПа;
- предельная растяжимость до 0,8%;
- длина 18 и 40 мм;
- диаметр 0,024 мм.

Пено- и фибропенобетонные смеси изготавливали по одностадийной технологии в лабораторном турбулентном смесителе емкостью 60 л. Для осуществления экспериментальных исследований формовали образцы-кубы с ребром 100 мм и образцы-балки размерами 40×40×160 и 100×100×300 мм.

Свойства исследуемых бетонов
Properties of the investigated concretes

Вид и длина фибры	Размеры образцов, мм			Средняя плотность бетона, кг/м ³	Прочность, МПа		Начальный модуль упругости на растяжение при изгибе, МПа	Деформации при появлении трещины в растянутой зоне, мм/м
	Длина	Ширина	Высота		При сжатии	На растяжение при изгибе		
ПП длиной 18 мм	160	40	40	726	–	1,38	6380	0,51
	305	100	100	718	–	0,95	4950	0,50
	100	100	100	721	2,69	–	–	–
ПП длиной 40 мм	160	40	40	715	–	1,78	7280	0,54
	305	100	100	711	–	1,22	5170	0,52
	100	100	100	711	2,87	–	–	–
УВ длиной 18 мм	160	40	40	728	–	2,04	7810	0,42
	305	100	100	739	–	1,57	5380	0,41
	100	100	100	732	3,02	–	–	–
УВ длиной 40 мм	160	40	40	719	–	2,52	8772	0,41
	305	100	100	714	–	2,07	6100	0,42
	100	100	100	712	3,44	–	–	–
Пенобетон без фибры (контрольный)	160	40	40	730	–	0,487	4672	0,36
	305	100	100	728	–	0,306	3224	0,35
	100	100	100	736	2,72	–	–	–

Все изучаемые образцы твердели в нормальных условиях, после чего подвергались физико-механическим испытаниям в соответствии с требованиями ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Экспериментальную оценку механических свойств исследуемых бетонов осуществляли на испытательном прессе «Matest S-205» с точностью измерения нагрузки 0,001 кН и автоматической регистрацией данных в координатах «нагрузка–деформации». Полученные результаты представлены в таблице и на рис. 1 и 2.

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что введение в рецептуру пеносмесей минеральной или синтетической фибры оказывает важное и существенное влияние на эксплуатационные свойства затвердевшего конструкционно-теплоизоляционного пенобетона.

Предельная деформативность бетонных материалов относится к перечню их важнейших эксплуатационных свойств потому, что

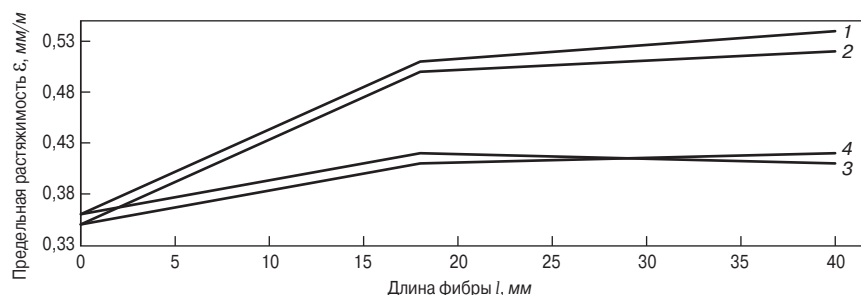


Рис. 1. Взаимосвязь предельной растяжимости фибропенобетона D700 со свойствами фибры: 1 – полипропиленовая фибра (40×40×160 мм); 2 – полипропиленовая фибра (100×100×100 мм); 3 – углеродное волокно (40×40×160 мм); 4 – углеродное волокно (100×100×300 мм)

Fig. 1. the relationship of the ultimate extensibility of fiber foam concrete D700 with the properties of fiber: 1 – polypropylene fiber (40×40×160 mm); 2 – polypropylene fiber (100×100×100 mm); 3 – carbon fiber (40×40×160 mm); 4 – carbon fiber (100×100×300 mm)

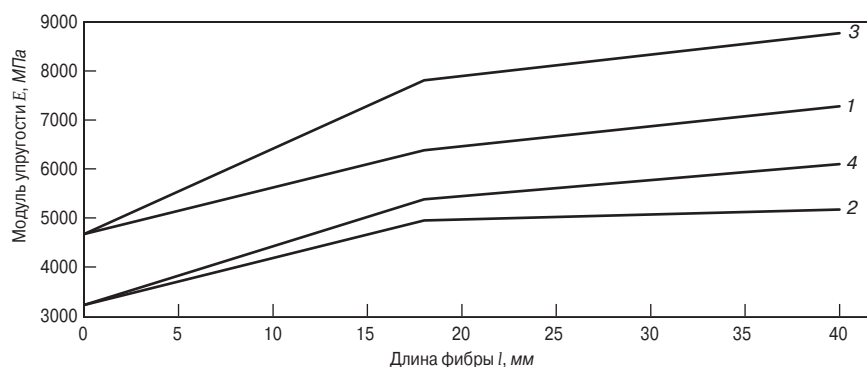


Рис. 2. Взаимосвязь модуля упругости фибропенобетона со свойствами фибры: 1 – полипропиленовая фибра (40×40×160 мм); 2 – полипропиленовая фибра (100×100×100 мм); 3 – углеродное волокно (40×40×160 мм); 4 – углеродное волокно (100×100×300 мм)

Fig. 2. The relationship of the elastic modulus of fiber foam concrete with the properties of fiber: 1 – polypropylene fiber (40×40×160 mm); 2 – polypropylene fiber (100×100×100 mm); 3 – carbon fiber (40×40×160 mm); 4 – carbon fiber (100×100×300 mm)

порог образования микротрещин, управляющих периодом безремонтной эксплуатации строительных конструкций, зависит от величины предельной растяжимости.

Эксперимент показал (см. таблицу), что дисперсное армирование пенобетонов волокнами позволяет увеличивать их предельную растяжимость на 17–43%. Причем эффект улучшения корреляционно связан с индивидуальными свойствами фибры и ее вещественной природой.

Чем длиннее отдельные волокна, вводимые в состав пенобетонных смесей, тем больший эффект был получен в ходе экспериментальных исследований. Установлено, что абсолютные значения растяжимости зависят от предельной растяжимости фибры. У полипропиленового волокна предельная растяжимость более чем на порядок превышает растяжимость углеродного. Поэтому, несмотря на наличие УВ в структуре пенобетона, его растяжимость растет незначительно, в то время как фибропенобетонные образцы с полипропиленом увеличили ее почти в 1,5 раза (рис. 1).

Наличие и вид фибры важны при учете ее влияния на начальный модуль упругости. Из экспериментальных данных (см. таблицу) следует, что чем выше модуль упругости фибры, тем более высоким может быть начальный модуль упругости дисперсно-армированного пенобетона. Как и для ранее рассмотренного свойства, оказались важны индивидуальные характеристики фибры и ее длина (рис. 2).

Одним из важнейших свойств строительных материалов является их прочность на растяжение при изгибе. Величина данного показателя у изделий из фибропенобетонов неавтоклавного твердения позволит исключить потери при транспортировании и монтаже, а также прогнозировать существенное улучшение эксплуатационных свойств.

Результаты, полученные в ходе эксперимента, подтверждают, что при необходимости на практике повысить прочность пенобетона при сжатии следует применять углеродную фибру. При этом чем длиннее

будут волокна, тем больший технический эффект может быть получен.

Поскольку в ходе исследований оценку прочности на растяжение при изгибе осуществляли на образцах-балках различных размеров, то полагаем важным обратить внимание на системное проявление масштабного эффекта. Чем меньше размеры испытуемых образцов, тем выше значения прочности и начального модуля упругости (см. таблицу). У пенобетонов разница значений за счет проявления масштабного фактора достигает 1,5 раз, а у фибропенобетонов сужается до 30%, что позволяет прогнозировать большую эксплуатационную надежность изделий из них.

Выводы

Краткий обзор развития технологии ячеистых бетонов показал, что автоклавное производство газосиликата достигло пика своего развития. Отражены достижения практического применения в строительстве дисперсно-армированных пенобетонов безавтоклавного твердения. Показано, что дисперсное армирование волокнами позволяет существенно расширять номенклатуру энерго- и ресурсоэффективных изделий заводского изготовления. Причиной достигнутого результата являются наличие дисперсного армирования и изменения, возникающие в пенобетонных смесях в период их фазового перехода из вязкого в твердое, которые определяют ряд существенно лучших эксплуатационных свойств.

Экспериментальная оценка прочности и предельной растяжимости исследованных пенобетонов показала, что на величину контролируемых свойств оказывают влияние:

- индивидуальные свойства фибры, определяемые ее вещественной природой;
- длина фибры.

Чем длиннее фибра, тем большим может быть практический эффект от ее применения в технологии пенобетонов.

Список литературы

1. Mehlhart G., Bakas I., Herczeg M., Strosser P., Rynikiewicz C. Agenais study on the energy saving potential of increasing resource efficiency. Final Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2016. 86 p. http://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/final_report.pdf
2. Федеральный закон № 261-ФЗ от 23 ноября 2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности».
3. Вишневский А.А., Гринфельд Г.И., Смирнова А.С. Производство автоклавного газобетона в России // *Строительные материалы*. 2015. № 6. С. 52–54.

References

1. Mehlhart G., Bakas I., Herczeg M., Strosser P., Rynikiewicz C. Agenais study on the energy saving potential of increasing resource efficiency. Final Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2016. 86 p. http://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/final_report.pdf
2. Federal Law No. 261-FZ of November 23, 2009 “On Energy Conservation and on Improving Energy Efficiency”. (In Russian)
3. Vishnevsky A.A., Grinfeld G.I., Smirnova A.S. Production of autoclaved aerated concrete in Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 6, pp. 52–54. (In Russian).

4. Давидюк А.А., Фискинд Е.С., Гусарь О.А., Балакирева В.В. Преимущества в производстве и применении блоков из ячеистого бетона // *Строительные материалы*. 2018. № 12. С. 41–43. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-766-12-41-43>
5. Парута В.А. Механика разрушения системы «газобетонная кладка — штукатурное покрытие» // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 3. С. 48–55.
6. Альбом технических решений по применению изделий из автоклавного газобетона торговая марка «Н+Н» в строительстве жилых, общественных и промышленных зданий. Материалы для проектирования и рабочие чертежи узлов. СПб., 2019. 152 с. https://www.hplush.ru/documents/20562/55438/albom_H%2BN_Redaction02-2019.pdf/1401b576-14f7-4dda-aae0-2791e4ec26f8
7. Фаликман В.Р., Сорокин Ю.В., Калашников О.О. Строительно-технические свойства особо высокопрочных быстротвердеющих бетонов // *Бетон и железобетон*. 2004. № 4. С. 5–10.
8. Bonakdar A., Babbitt F., Mobasher B. Physical and mechanical characterization of Fiber-Reinforced Aerated Concrete (FRAC) // *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 38, pp. 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.006>
9. Morgun V.N., Morgun L.V., Nagorskiy V.V. Diverse particles filler forms influence on mechanical properties foam concrete mixtures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 698. Iss. 2. 022088. (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/698/2/022088>)
10. Моргун В.Н., Моргун Л.В. Обоснование одного из методов совершенствования структуры пенобетонов // *Строительные материалы*. 2018. № 5. С. 24–26. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-759-5-24-26>
11. Morgun V., Morgun L., Votrin D., Nagorskiy V. Analysis of the synthetic fiber influence on the cement stone new formations composition in foam concrete. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1043, pp. 43–48.
12. Патент RU 2714541 C1 Пулепоглощающий материал (фибропенобетон) и способ его изготовления / Вотрин Д.А., Моргун Л.В., Виснап А.В., Моргун В.Н. Заявл. 25.07.2019. Опубл. 18.02.2020. Бюл. № 1.
13. Сертификат пожарной безопасности ССПБ. RU. ОП034. N 00037. «Изделия из фибропенобетона» по ТУ 5767-033-02069119–2003 соответствуют требованиям пожарной безопасности, установленным в НПБ 244–97: негорючий материал по ГОСТ 30244–94 «Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть».
4. Davidyuk A.A., Fiskind E.S., Gusar' O.A., Balakireva V.V. Advantages in production and application of cellular concrete blocks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 12, pp. 41–43. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-766-12-41-43> (In Russian).
5. Paruta V.A. Mechanics of destruction of the system “aerated concrete masonry — plaster coating”. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. No. 3, pp. 48–55. (In Russian).
6. Album of technical solutions for the use of autoclaved aerated concrete products trademark “N + N” in the construction of residential, public and industrial buildings. Materials for design and working drawings of nodes. SPb. 2019. 152 p. https://www.hplush.ru/documents/20562/55438/albom_H%2BN_Redaction02-2019.pdf/1401b576-14f7-4dda-aae0-2791e4ec26f8 (In Russian)
7. Falikman V.R., Sorokin Yu.V., Kalashnikov O.O. Construction and technical properties of especially high-strength fast-hardening concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2004. No. 4, pp. 5–10. (In Russian).
8. Bonakdar A., Babbitt F., Mobasher B. Physical and mechanical characterization of Fiber-Reinforced Aerated Concrete (FRAC). *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 38, pp. 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.006>
9. Morgun V.N., Morgun L.V., Nagorskiy V.V. Diverse particles filler forms influence on mechanical properties foam concrete mixtures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 698. Iss. 2. 022088. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/698/2/022088>
10. Morgun V.N., Morgun L.V. Substantiation of one of the methods for improving the structure of foam concretes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 5, pp. 24–26. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-759-5-24-26> (In Russian).
11. Morgun V., Morgun L., Votrin D., Nagorskiy V. Analysis of the synthetic fiber influence on the cement stone new formations composition in foam concrete. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1043, pp. 43–48.
12. Patent RF No. 2714541 *Bullet-absorbing material (fiber foam concrete) and method for its manufacture*. Votrin D.A., Morgun L.V., Visnap A.V., Morgun V.N. Declared 25.07.2019. Published 18.02.2020. (In Russian).
13. Certificate of fire safety SSPB. RU. OP034. N 00037. “Fibro-foam concrete products” according to TU 5767-033-02069119–2003 comply with fire safety requirements established in NPB 244–97: non-combustible material according to GOST 30244–94 “Building materials. Methods of testing for combustibility”. (In Russian).

УДК 693.1:691.42.001.5

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-55-61>В.Н. ДЕРКАЧ¹, д-р техн. наук (v-derkach@yandex.ru);П.А. БАКУСОВ², инженер, ассистент кафедры информационных технологий (bakusovpavel@gmail.com);Р.Б. ОРЛОВИЧ³, д-р техн. наук, профессор (orlowicz@mail.ru)¹ Филиал Республиканского унитарного предприятия «ИНСТИТУТ БелНИИС» (Республика Беларусь, 224023, г. Брест, ул. Московская, 267/2)² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4)³ ООО «ПИ Георекострукция» (190005, г. Санкт-Петербург, Измайловский пр., 4, оф. 414)

Оценка эффективности инъектирования и вычинки поврежденной каменной кладки

При нарушении технологии ремонта поврежденной каменной кладки вычинкой или инъектированием восстановленные участки конструкции в процессе дальнейшей эксплуатации могут подвергаться деструкции и трещинообразованию. В настоящее время отсутствуют нормативные методы контроля качества восстановления поврежденной каменной кладки. Предложена методика оперативного контроля качества инъектирования трещин и вычинки каменной кладки, основанная на сравнении физико-механических характеристик отремонтированных участков с подлинной кладкой. Для исследования используются датчики, регистрирующие колебания конструкции, вызванные микросейсмическим фоном. Один датчик являлся неподвижным, устанавливаемым вблизи отремонтированного участка, второй – переносным. Сначала измеряют колебания участка неповрежденной кладки, а затем колебания участка кладки с отремонтированным дефектом. На основании результатов измерений рассчитывают коэффициенты когерентности, по значению которых судят о качестве выполнения ремонтных работ.

Ключевые слова: каменная кладка, инъектирование, вычинка, датчики колебаний, коэффициент когерентности.

Для цитирования: Деркач В.Н., Бакусов П.А., Орлович Р.Б. Оценка эффективности инъектирования и вычинки поврежденной каменной кладки // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 55–61. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-55-61>

V.N. DERKACH¹, Doctor of Sciences (Engineering), (v-derkach@yandex.ru);P.A. BAKUSOV², Engineer, Assistant of the department of information technology (bakusovpavel@gmail.com);R.B. ORLOWICZ³, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (orlowicz@mail.ru)¹ Branch office of the RUE "Institute BelNIIS" – Scientific-Technical Center (267/2, Moskovskaya Street, Brest, 224023, Republic of Belarus)² Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2nd Krasnoarmeiskaya Street, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation)³ «Georeconstruction» PI ООО (office 414, 4, Izmaylovskiy Avenue, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation)

Evaluation of the Effectiveness of Injection and Repair of Damaged Masonry

In violation of the technology for repairing damaged masonry by repairing or injection, the restored areas of masonry in further exploitation may be subject to destruction and cracking. Currently, there are no regulations for quality control of the restoration of damaged masonry. A technique for the operational quality control of injection of cracks or repairing of masonry is proposed, based on a comparison of the physical and mechanical characteristics of the repaired areas with basic masonry. For the study, sensors are used that record vibrations of the structure caused by the microseismic background. One sensor was fixed, installed near the repaired area, the second was portable. First, the vibrations of the area of the intact masonry are measured, and then the vibrations of the area of the masonry with a repaired defect. Based on the measurement results, the coherence coefficients are calculated, the value of which is used to evaluate the quality of the repair work.

Keywords: masonry, injection, repairing, vibration sensors, coherence coefficient.

For citation: Derkach V.N., Bakusov P.A., Orlovich R.B. Evaluation of the effectiveness of injection and repair of damaged masonry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 55–61. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-55-61>

Среди многочисленных проблем современного градостроительства проблема сохранения исторического наследия занимает одно из ведущих мест. Исключительно важное значение при этом приобретают работы, связанные с восстановлением поврежденной каменной кладки. Одними из широко применяемых методов восстановления каменной кладки являются ее инъектирование и вычинка. Необходимость в указанных работах возникает в случае повреждения кладки трещинами либо ее локальной деградации. Наиболее распространенные причины образования трещин в каменных зданиях связаны с неравномерными осадками основания (60–70%), перегрузкой (15–20%), температурными деформациями (10–15%), усадкой и набуханием кладочных ма-

териалов (5–8%) и с динамическими и особыми воздействиями (2–5%) [1]. Трещиностойкость каменных конструкций существенно зависит от материала растворных швов и камней. Кладки на мягких растворах, например известковых, менее чувствительны к образованию трещин, чем кладки на жестких цементных растворах. Кладки из полнотелых камней являются более трещиностойкими по сравнению с щелевыми, особенно с повышенной пустотностью. При этом различают конструктивные трещины, разделяющие каменную кладку на отдельные фрагменты, и поверхностные трещины в самой кладке или на отделке стен (штукатурке, облицовочной плитке). Общепринятыми параметрами трещин являются их глубина d и ширина раскрытия W (рис. 1, а). При на-

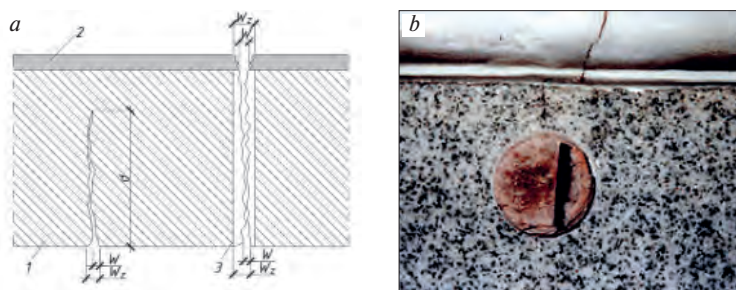


Рис. 1. Измерение глубины и ширины раскрытия трещины в каменной кладке: *a* – схема измерения; *b* – удаление штукатурного слоя; 1 – каменная кладка; 2 – штукатурка; 3 – вертикальный растворный шов; *W* – правильно измеренная ширина трещины; *W₂* – неправильно измеренная ширина трещины; *d* – глубина трещины

Fig. 1. Measuring the depth and width of a crack in masonry: *a* – measurement scheme; *b* – removal of the plaster layer; 1 – masonry; 2 – plaster; 3 – vertical mortar joint; *W* – the correctly measured crack width; *W₂* – the incorrectly measured crack width; *d* – crack depth

личии штукатурного слоя для измерения ширины раскрытия трещины необходимо его локальное удаление на всю толщину до каменной кладки (рис. 1, *b*). Поверхностные трещины с глубиной *d* характерны для конструкций, работающих на внецентренное сжатие (столбы, стены), сжатие с изгибом (каменные своды, арки) либо на изгиб (стенные заполнения каркасно-монолитных зданий). Их раскрытие обычно происходит по неперевязанному сечению и связано с истощением прочности кладки от действия растягивающих напряжений, перпендикулярных горизонтальным растворным швам. Следует отметить, что в соответствии с СП 15.13330.2020 «Каменные и армокаменные конструкции» конструкции, в которых по условиям эксплуатации не может быть допущено появления трещин в штукатурных и других покрытиях, должны быть проверены на деформации растянутых поверхностей.

Наиболее опасными являются сквозные трещины на всю толщину каменных конструкций, которые могут быть следствием независимого или совместного действия сжимающих *N* и сдвигающих *Q* усилий (рис. 2).

Усилия *N*, как правило, вызывают вертикальные трещины по перевязанным сечениям, в то время как действие сдвиговых усилий *Q*, вызванное горизонтальными нагрузками либо неравномерными осадками основания, приводит к образованию наклонных трещин, перпендикулярных направлению главных растягивающих напряжений σ_1 . Следует отметить, что последние действуют под углом α к горизонтальным растворным швам, в направлении которого сопротивление кладки растяжению R_{at} резко снижается:

$$R_{at} = \frac{R_{0t}}{1 + (n - 1) \sin^2 \alpha}, \quad (1)$$

где $n = \frac{R_{90t}}{R_{0t}}$ – степень анизотропии прочности кладки при растяжении; R_{0t} , R_{90t} – сопротивление кладки растяжению под углом соответственно 0° и 90° к горизонтальным растворным швам; λ – опытный коэффициент, равный двум для кладки из полнотелого кирпича и трем – из пустотного.

В зависимости от величины сцепления растворных швов с камнями трещины могут проходить по

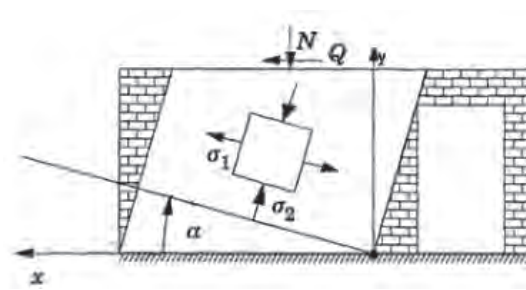


Рис. 2. Стена из каменной кладки в условиях сложного напряженного состояния

Fig. 2. Masonry wall under conditions of complex stress state

кирпичу либо по штрабе, существенно изменяя при этом статическую схему работы конструкций и снижая их несущую способность.

Наиболее распространенным способом ремонта трещин является их инъектирование [2]. Подготовительные работы при этом включают высверливание скважин и установку в них инъекторов, очистку трещин и поверхности кладки от образующегося при сверлении шлама и пыли, герметизацию трещин путем оштукатуривания тонким слоем цементного раствора. Инъектирование должно осуществляться материалом, стойким к атмосферным воздействиям, в том числе воздействию знакопеременных температур и инсоляции. Кроме того, инъекционные растворы должны обладать малым водоотделением, необходимой вязкостью, требуемой прочностью при сжатии и сцеплением, незначительной усадкой, высокой морозостойкостью. С этой целью применяются цементные, микроцементные, полимерцементные, вспененные цементные растворы, а иногда синтетические эпоксидные и полиуретановые смеси. Выбор инъекционного раствора зависит от толщины трещины и динамики ее развития во времени при деформировании кладки от температурно-влажностных и силовых воздействий. Нестабильные во времени трещины инъектируют вязкими составами, а стабильные – более жесткими. В процессе инъектирования контролируется количество закачанного раствора, объем его распространения, а также давление раствора.

Согласно экспериментальным исследованиям сжатых каменных образцов [2] инъекцию трещин и пустот следует рассматривать как метод, позволяющий восстановить лишь ее монолитность, а не увеличивающий сопротивление сжатию. Кроме того, при инъекции кладки с крупными трещинами и полостями должны применяться безусадочные растворы с использованием песка или специальных добавок без большого содержания воды, что не всегда соблюдается на практике. Еще меньший эффект наблюдается при инъектировании трещин, вызванных действием растягивающих напряжений σ_1 (рис. 2). Это подтверждается выполненными авторами испытаниями серии изгибаемых образцов, которые доводились до разрушения сосредоточенной нагрузкой (рис. 3, *a*).

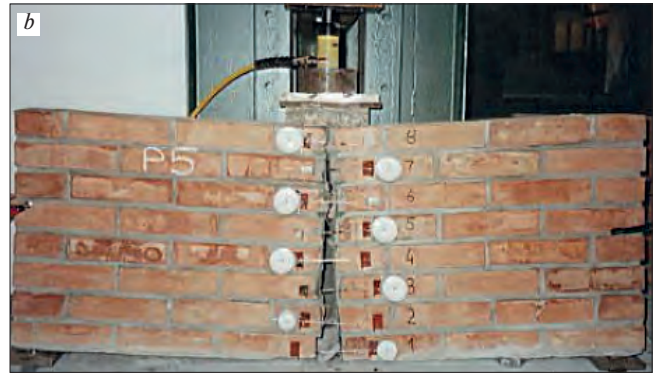
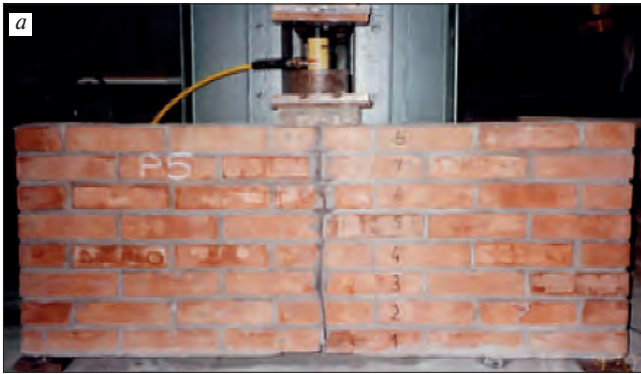


Рис. 3. Изгибаемый образец каменной кладки с инъецированной вертикальной трещиной: *a* – в процессе нагружения; *b* – после разрушения
Fig. 3. Bending masonry specimen with injected vertical crack: *a* – in the process of loading; *b* – after destruction

После разрушения по перевязанному сечению, т. е. в результате разрыва камней, вертикальная трещина инъецировалась полимерцементными и микроцементными растворами, после чего образцы вновь подвергались испытаниям (рис. 3, *a*). Во всех случаях разрушение происходило в зоне контакта трещины с инъецированным раствором (рис. 3, *b*), а разрушающая нагрузка в среднем была в два и более раза меньшей по сравнению с цельными образцами. Это объясняется низким сцеплением инъецированного раствора по сравнению с прочностью камней при растяжении, а также наличием микротрещин в керамическом черепе камней в зонах его разрушения при растяжении. Именно поэтому участки каменной кладки с подвижными трещинами силового происхождения кроме инъецирования необходимо армировать, например стержнями, осажеными в горизонтальные растворные швы либо в наклонно просверленные отверстия.

Наблюдения за поведением инъецированных неармированных трещин показывают, что при действии отрицательной температуры возможно их раскрытие с образованием вторичных трещин на границе контакта раствора с каменной кладкой. Это связано с линейными деформациями разделенных трещиной участков стен длиной L_1 и L_2 . При наличии инъецированного раствора толщиной α последний при понижении температуры кладки на величину ΔT будет подвергаться растяжению. Возникающие при этом в инъециционных швах растягивающие напряжения определяются из выражения:

$$\sigma = \frac{\Delta T \alpha E (L_1 + L_2)}{\alpha}, \quad (2)$$

где α и E – соответственно коэффициент температурных деформаций каменной кладки и модуль упругости инъецированного раствора.

При превышении напряжений σ сопротивления инъециционного шва растяжению или его сцепления с каменной кладкой в нем развиваются вторичные трещины, которые также могут проявляться на оштукатуренных поверхностях. Атмосферная влага, попадая в эти трещины при замерзании, приводит к их дальнейшему раскрытию.

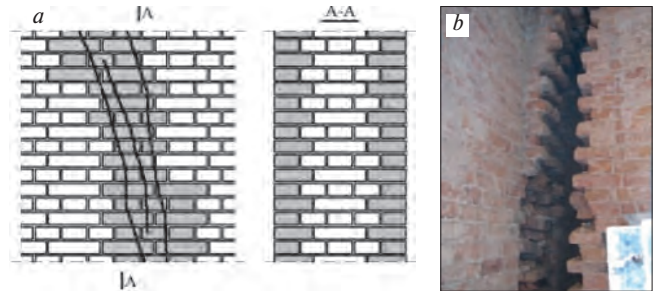


Рис. 4. Вычинка участков каменной кладки в зоне трещин: *a* – схема вычинки; *b* – общий вид разделанной трещины
Fig. 4. Repairing sections of masonry in the area of cracks: *a* – the scheme of the repairing; *b* – general view of the split crack

Ремонт крупных трещин либо нескольких рядом расположенных трещин рекомендуется производить путем вычинки кладки с ее перевязкой с неразрушенной кладкой (рис. 4, *a*). При этом кладку стены по длине трещины разбирают на глубину в полкирпича и ширину не менее одного кирпича (рис. 4, *b*) с последующей закладкой штрабы новым кирпичом в перевязку со старым.

Вычинка также применяется при восстановлении полностью утраченных или деструктурированных фрагментов кладки, а также при необходимости сохранения ее лицевой фактуры (рис. 5). При этом кладка должна выполняться с соблюдением системы перевязки и расшивкой швов, по аналогии с подлинной кладкой.

Для вычинки кирпичной кладки используются сухие растворные смеси заводского изготовления, марка и химический состав которых должны быть подобны растворным швам восстанавливаемой кладки. Это требование также относится к камням, которые согласно ГОСТ Р-59437–2021 «Сохранение памятников каменного зодчества» должны соответствовать марке и морозостойкости камней подлинной кладки. Исследования сжатых каменных элементов показали, что монолитность кладки на участках с вычинкой достаточно низка и для ее восстановления рекомендуется инъеция раствора под давлением в швы кладки [3]. При этом наибольший эффект может быть достигнут при одновременной установке шпилек, связывающей старую и вычиненную кладку. Следует отметить, что при нарушении технологии вычинки восстанавливаемые участки каменной кладки в про-



Рис. 5. Примеры подлежащей вычинке деградировавшей каменной кладки: *a* – простенок; *b* – подоконный пояс; *c* – перемычка

Fig. 5. Examples of degraded masonry to be repaired: *a* – pier; *b* – window sill; *c* – jumpers

цессе дальнейшей эксплуатации могут подвергаться деструкции либо трещинообразованию (рис. 6).

В связи с изложенным актуальным является оценка качества выполняемых работ по инъектированию и вычинке, особенно в исторических зданиях. При этом на сегодняшний день нормативные методы, касающиеся таких оценок, отсутствуют. Новейшие разработки программного обеспечения и измерительных приборов позволяют выполнять такие оценки с применением неразрушающих или малоразрушающих методов контроля. Например, заслуживает внимания метод ультразвуковой дефектоскопии, позволяющий выявлять дефекты в виде трещин и пустот в каменных конструкциях.

В настоящее время в зарубежной практике для обследования каменных зданий и сооружений начали применяться георадары (рис. 7).

Метод основан на измерении скорости распространения электромагнитных волн, глубина проникновения которых зависит от их частоты [4, 5]. Например, короткие волны частотой 1,5–2 ГГц имеют глубину проникновения в несколько сантиметров или дециметров с высокой разрешающей способностью. Для волн большей длины с частотой 200 МГц глубина проникновения достигает нескольких метров, но с низкой разрешающей способностью. Получаемые радарограммы позволяют создать так называемые карты неоднородности конструкции по ее толщине и по всей поверхности. Этот метод, однако, требует междисциплинарного сотрудничества между опытными специалистами в области строительства и геофизики, а приборное оборудование пока является дорогостоящим.

Сходными являются методы, позволяющие оценивать состояние конструкций по оценке их динамических параметров. Для этого в качестве динамической нагрузки рассматривается либо удар [6, 7], либо сейсмический фон [8–11].

По мнению авторов, контроль качества инъектирования и вычинки каменной кладки в производственных условиях следует осуществлять методами, позволяющими сравнивать физико-ме-



Рис. 6. Примеры повреждений восстановленной каменной кладки: *a* – деструкция лицевого слоя; *b* – трещины в области вычинки

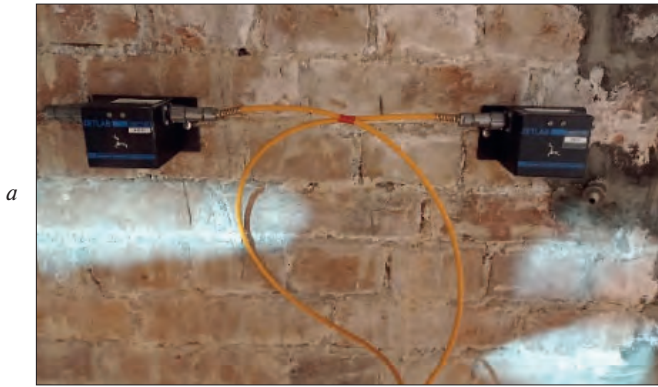
Fig. 6. Examples of damage to restored masonry: *a* – destruction of the facial layer; *b* – cracks in the area of the repairing



Рис. 7. Обнаружение трещин, пустот и каналов внутри каменных стен с помощью георадара

Fig. 7. Detection of cracks, voids and channels inside stone walls using ground penetrating radar

1-й этап



a

2-й этап



b

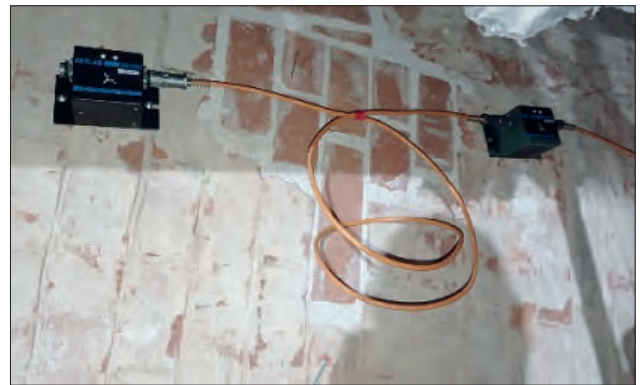
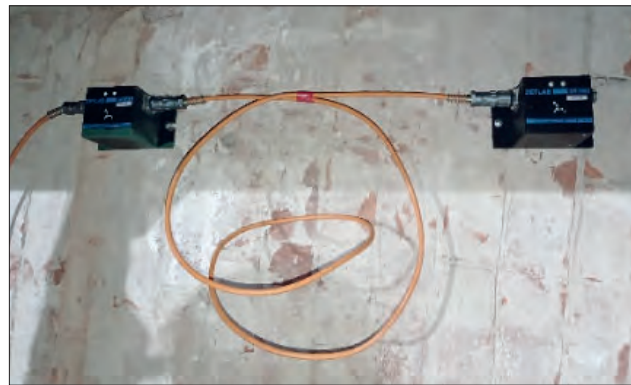


Рис. 8. Контроль качества отремонтированной каменной кладки: а – инъектирование трещины; б – вычинка кладки
Fig. 8. Quality control of repaired masonry: а – crack injection; б – repairing masonry

ханические характеристики отремонтированных участков с подлинной кладкой. В связи с этим перспективным может быть неразрушающий метод, сущность которого сводится к следующим процедурам. Для исследования используются датчики, регистрирующие колебания конструкции, вызванные микро-сейсмическим фоном. Датчики могут регистрировать перемещение (сейсмометры), скорость (вело-симетры), или ускорение (акселерометры) колебаний. Важно, чтобы они имели достаточную чувствительность в области низких частот. Перед измерениями проводится визуальная оценка зоны обследования, включающей подлинный и отремонтированный участки каменной кладки. Далее проводятся измерения в два этапа с помощью двух датчиков. Один датчик являлся опорным, т. е. неподвижным, устанавливаемым вблизи отремонтированного участка, второй – переносным. На первом этапе измерений переносной датчик устанавливается так, чтобы между обоими датчиками располагалась подлинная неповрежденная кладка. Полученный результат считается эталонным. На втором этапе переносной датчик представляется таким образом, чтобы между датчиками находился участок с отремонтированным дефектом. Расстояние между двумя датчиками на обоих этапах должно быть одинаково (рис. 8).

Пусть для определенности сигнал, полученный с опорного датчика, имеет индекс 1, а переносного – 2. По полученным на обоих этапах записям рассчитываются коэффициенты когерентности γ (формула при-

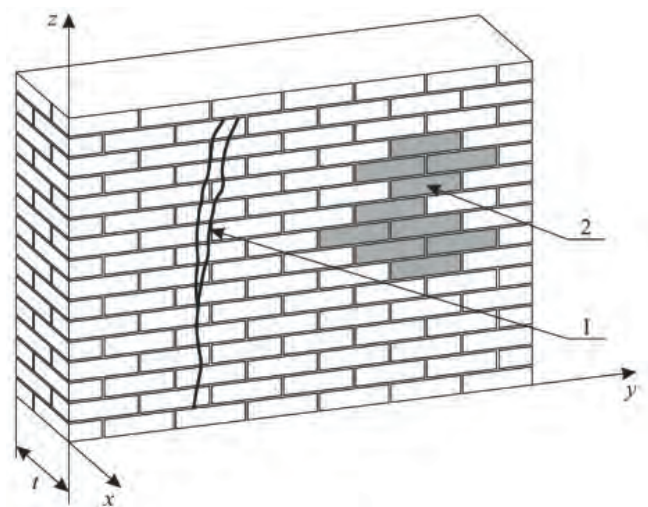


Рис. 9. Ориентация направлений измерения инъектированных трещин и вычинки в каменной стене: 1 – трещины; 2 – вычинка

Fig. 9. Orientation of measurement directions for injected cracks and repairing in masonry wall: 1 – cracks; 2 – repairing

водится для квадрата данного коэффициента, как принято в тематической литературе), которые зависят от частоты f и изменяются в пределах от 0 до 1 [12–15]:

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{12}(f)|^2}{G_1(f)G_2(f)}, \quad (3)$$

где $G_{12}(f)$ – взаимный спектр сигналов 1 и 2; $G_1(f)$ и $G_2(f)$ – спектры мощности сигналов 1 и 2 соответственно. Чем выше значение коэффициента коге-

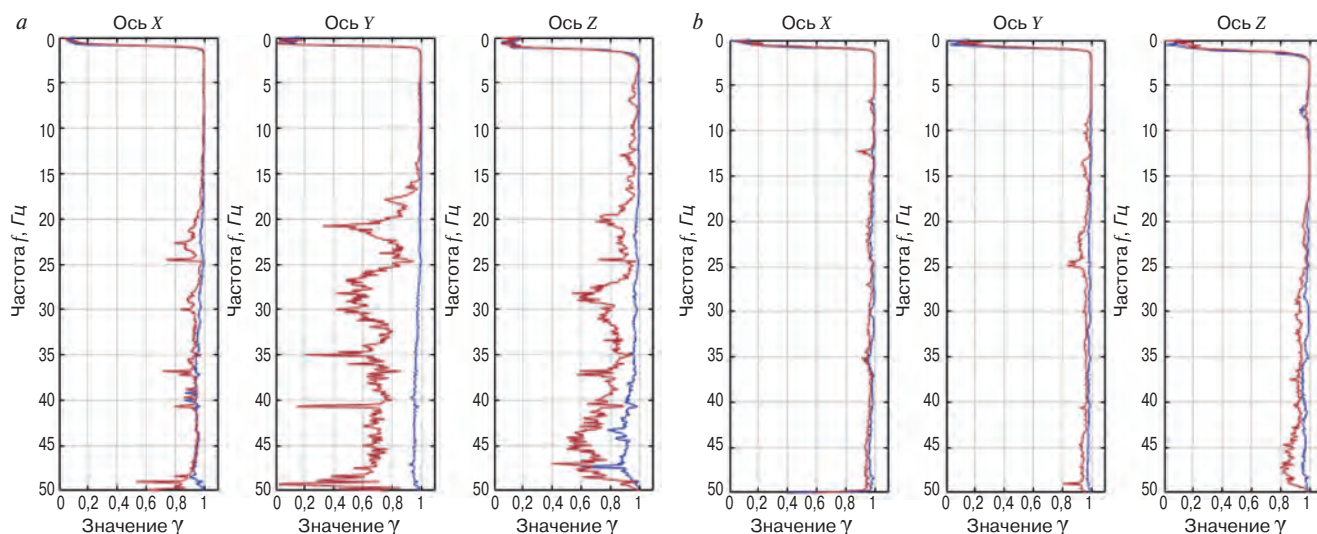


Рис. 10. Графики коэффициента когерентности γ : *a* – инъекционная трещина; *b* – вычинки кладки; синие кривые относятся к подлинной кладке, красные – к отремонтированным участкам

Fig. 10. Coherence coefficient γ plots: *a* – injecting crack; *b* – repairing masonry; blue curves refer to original masonry; red curves to repaired areas

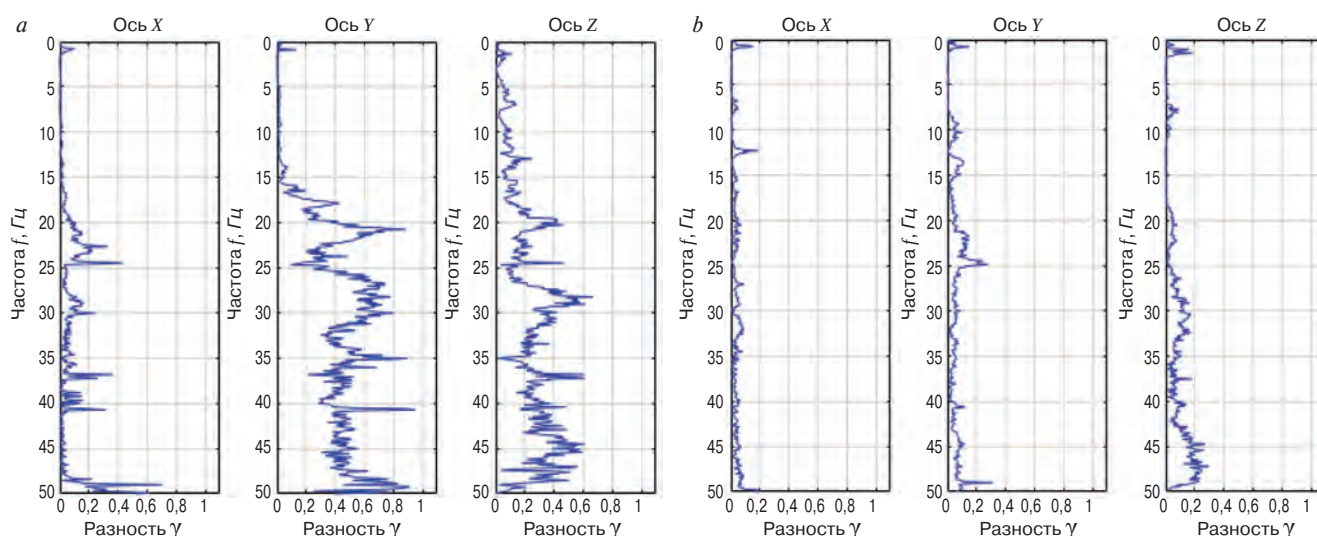


Рис. 11. Графики разности коэффициентов когерентности γ 1-го и 2-го этапов измерений: *a* – инъекционная трещина; *b* – вычинки кладки

Fig. 11. Plots of the difference between the coherence coefficients γ of the 1st and 2nd stages of measurements: *a* – injected crack; *b* – repairing masonry

рентности на определенной частоте, тем выше связь между двумя датчиками на ней, что можно интерпретировать как большую целостность фрагмента конструкции на участке между датчиками. Далее в одной и той же системе координат «частота f – значение коэффициента когерентности γ » по каждому направлению X , Y , Z строятся графики коэффициента когерентности γ для двух этапов измерений (рис. 9).

На рис. 10 представлена визуализация выполненных авторами измерений участков с инъекционной трещиной и вычинкой. В качестве датчиков использовались велосиметры, измеряющие скорость колебаний. На рис. 10 представлены опытные результаты оценки коэффициента когерентности γ , а на рис. 11 – графики разности данного коэффициента по 1-му и 2-му этапам. Как видно, в обоих случаях в направлении оси X , т. е. по толщине стены, дефекты инъекции и вычинки выражены слабо. В направлении осей Y и

Z различия между коэффициентами когерентности более заметны, особенно в случае инъекционной трещины. Особенно большие отклонения начиная с частот 20–25 Гц зафиксированы в направлении оси Y . Поскольку именно в направлении раскрытия трещины коэффициент когерентности показывает наихудший результат, есть основания полагать о ее некачественном инъектировании. Также на графиках виден «провал» в диапазоне от 0 до 1 Гц (рис. 10) – это связано с чувствительностью датчика: его частотный диапазон начинается от 0,5 Гц.

Поскольку представленная методика находится в стадии разработки, какие-либо строгие количественные оценки качества ремонтных работ пока отсутствуют. На данном этапе можно пользоваться двумя правилами. Во-первых, считать значения коэффициента когерентности в некоторой области частот ниже 0,75 неудовлетворительными для проведенных работ

(по аналогии с коэффициентом корреляции, для которого это же эмпирически полученное значение является границей между скоррелированными процессами и нет). Во-вторых, проводить серию измерений до и после выполнения работ по устранению дефектов, в том числе и несколько раз через некоторое время, например через месяц. Тогда, сравнивая результаты измерений до и после ремонтных работ, можно сделать вывод, повлияли ли они качественно на изменение ситуации, а, сравнивая результаты после ремонта, имеется ли тенденция к проявлению устраненного дефекта, и если да, то поднимать вопрос о причинах. Также с точки зрения практического применения приведенная методика требует калибровки (градуировки) на отдельных образцах, которые должны быть испытаны в лабораторных условиях. В результате таких испытаний авторами предполагается получить корреляционные зависимости между прочностными характеристиками цельной каменной кладки и отремонтированной методом инъектирования и вычинки с разным уровнем качества выполнения работ.

Выводы

Предложен неразрушающий метод оценки качества выполнения работ по восстановлению поврежденной каменной кладки инъектированием трещин и вычинкой. Суть разработанного метода заключается в регистрации и сопоставлении частот колебаний, вызванных микросейсмическим фоном отремонтированных и подлинных участков каменной кладки. Предлагаемая методика оперативного контроля качества ремонта каменных конструкций позволит повысить их надежность и, как следствие, снизить финансовые расходы на содержание восстановленных конструкций.

Список литературы / References

- Malyszko L., Orłowicz R. Konstrukcje murowe. Zarysowania i naprawy. Olsztyn: WUWM. 2000. 153 p.
- Ищук М.К. Усиление каменных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2006. № 8. С. 28–30.
- Ishchuk M.K. Strengthening of stone structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2006. No. 8, pp. 28–30. (In Russian).
- Ищук М.К. Совместная работа старой и новой кладок на участках с вычинками // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 1. С. 28–29.
- Ishchuk M.K. Joint work of old and new masonry in areas with replacement. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014. No. 1, pp. 28–29. (In Russian).
- Patitz G. Bestandserfassung mit Bauradar – ein zerstörungsfreies Verfahren für die Praxis. *Mauerwerk*. 2013. Vol. 17. Iss. 4, pp. 196–200. DOI: 10.1002/dama.201300579
- Wiggenhauser H., Behrens M., Mouser D., Moryson R.M., Pudovikov S., Herrmann H-G. Non-destructive assessment of retaining wall of former coal mine plant. *Mauerwerk*. 2018. Vol. 22. Iss. 3, pp. 175–186. DOI: 10.1002/dama.201700021
- Kwiecien A., Chelmecki J., Matysek P. Non-destructive test of brick columns using change in frequency and inertancy response. *Structural Analysis of Historical Constructions*. 2012, pp. 2437–2444. <http://www.hms.civil.uminho.pt/sahc/2012/2437.pdf>
- Завалишин С.И., Шаблинский Г.Э., Зубков Д.А., Румянцев А.А. Динамический мониторинг зданий и сооружений для контроля их сейсмостойкости // *Предотвращение аварий зданий и сооружений*. 2009. № 2 (2). С. 1–12.
- Zavalishin S.I., Shablinskiy G.E., Zubkov D.A., Rummyantsev A.A. Dynamic monitoring of buildings and structures to control their seismic stability. *Predotvrashchenie avarii zdaniy i sooruzhenii*. 2009. No. 2 (2), pp. 1–12. (In Russian).
- Пономарёв И.С., Махнович С.В., Пантеев А.С. Особенности экспериментального определения частот и форм собственных колебаний цилиндрической оболочки // *Научный вестник НГТУ*. 2016. № 3 (64). С. 44–58.
- Ponomarev I.S., Makhnovich S.V., Pantileev A.S. Features of experimental determination of eigenfrequencies and modes of cylindrical shell oscillations. *Nauchnyi vestnik NGTU*. 2016. No. 3 (64), pp. 44–58. (In Russian).
- Gentile C., Saisi A., Cabboi A. Dynamic monitoring of a Masonry tower. *Structural Analysis of Historical Constructions*. 2012, pp. 2390–2397. DOI: 10.1051/mateconf/20152405003
- Elyamani A., Caselles J.O., Clapes J., Roca P. Assessment of dynamic behavior of Mallorca cathedral. *Structural Analysis of Historical Constructions*. 2012, pp. 2376–2384.
- Grosel J., Sawicki W., Wojcicki Z. Vibration measurements in analysis of historical structures. *Journal of Heritage Conservation*. 2012. Vol. 32, pp. 157–164.
- Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1971. 540 с.
- Bendat Dzh., Pirsol A. Izmerenie i analiz sluchajnykh processov [Measurement and analysis of random processes]. Moscow: Mir. 1971. 540 p.
- Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Т. 1, 2. М.: Мир, 1971. 316 с.; 285 с.
- Dzhenkins G., Vatts D. Spektral'nyy analiz i ego prilozheniya [Spectral analysis and its applications]. Vol. 1, 2. Moscow: Mir. 1971. 316 p.; 285 p.
- Рандалл Р.Б. Частотный анализ. Копенгаген: Брьюль и Кьер, 1989. 389 с.
- Randall R.B. Chastotnyy analiz [Frequency analysis]. Copenhagen: Bryul' i Ker. 1989. 389 p.
- Отнес Р., Энохсон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 428 с.
- Otnes R., Enochson L. Prikladnoi analiz vremennykh ryadov [Applied time series analysis]. Moscow: Mir. 1982. 428 p. (In Russian).

О.Б. РУДАКОВ, д-р хим. наук (robi57@mail.ru), Д.Е. БАРАБАШ, д-р техн. наук (barabash60170@yandex.ru), А.Д. БАРАБАШ, аспирант (barabashad@list.ru)

Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84)

Дисперсно-армированные радиационно стойкие композиты

Показана перспективность создания экранов из дисперсно-армированных композитов для объектов атомной отрасли, обеспечивающих защиту от радиации и обладающих удовлетворительными конструкционными свойствами. Обосновано использование в качестве связующего неизоцианатного полиуретана, синтезированного в результате нетрадиционной реакции уретанообразования между олигоэфиром с концевыми циклокарбонатными группами и диэтиленetriамином. Установлено, что полученное связующее обладает большим количеством водородных связей, обеспечивающим эффективное поглощение гамма-излучения и нейтронного потока. Выявлены ключевые недостатки полимерного связующего: зависимость физико-механических характеристик от температуры и сложно прогнозируемая долговечность при радиационном разогреве. Предложено решение указанной проблемы путем введения армирующих компонентов – полиамидных и стеклянных волокон. Определено рациональное содержание наполняющей группы, обеспечивающее необходимую технологическую вязкость, соответствующую литьевому способу изготовления изделий. Представлены результаты определения содержания армирующих волокон различного типа в радиационно стойком композите. Установлены зависимости «напряжения–деформации» для образцов композита при сжатии и растяжении в различных температурных условиях. Доказано улучшение теплофизических характеристик армированных композиций и повышение значений прочности. Определены технологические условия получения эффективных композитов, армированных волокнами различных типов. Для исследуемых рецептур установлены значения линейных коэффициентов ослабления гамма-излучения.

Ключевые слова: радиация, композит, армирование, неизоцианатный полиуретан, стекловолокно, полиамидное волокно, напряжение, деформация.

Авторы выражают благодарность профессору В.Т. Перцеву (ВГТУ) за ценные консультации. Экспериментальные исследования проводили на базе Коллективного исследовательского центра им. профессора Ю.М. Борисова Воронежского государственного технического университета, который частично поддерживается Министерством науки и образования Российской Федерации, Проект № 2021-2296-512-0001-060.

Для цитирования: Рудаков О.Б., Барабаш Д.Е., Барабаш А.Д. Дисперсно-армированные радиационно стойкие композиты // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 62–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-62-67>

O.B. RUDAKOV, Doctor of Sciences (Chemistry) (robi57@mail.ru), D.E. BARABASH, Doctor of Sciences (Engineering) (barabash60170@yandex.ru), A.D. BARABASH, graduate student (barabashad@list.ru)
Voronezh State Technical University (84, 20th Anniversary of October Street, Voronezh, 394006, Russian Federation)

Dispersed Reinforced Radiation-Resistant Composites

Prospects for nuclear branch of creation of the screens providing protection against radiation and possessing constructional properties are shown. Use as binding non-isocyanate polyurethane of the urethane synthesized as a result of nonconventional reaction between oligoether with trailer cyclocarbonate groups and diethylenetriamine is proved. It is established that the received binding possesses the large number of hydrogen communications providing effective absorption of gamma radiation and a neutron stream. Key shortcomings of polymeric binding – dependence of the physicist – mechanical characteristics from temperature and difficult predicted durability are revealed at a radiation warming up. Solutions of the specified problem by introduction of the reinforcing components – polyamide and glass fibers are shown. The rational maintenance of the filling group providing the necessary technological viscosity corresponding to a molding way of production of products is defined. Results of determination of concentration of the reinforcing fibers of various types in a radiation resistant composite are presented. Dependences of «tension deformation» for composite samples at compression and stretching in various temperature conditions are established. Improvement of heat physical characteristics of the reinforced compositions and increase of values of durability is proved. Technological conditions of receiving effective composites of various types reinforced by fibers are defined. For the studied compounding values of linear coefficients of easing scale of radiation are established.

Keywords: radiation, composite, reinforcing, non-isocyanate polyurethane, fiber glass, polyamide fiber, tension, deformation.

The authors are grateful to professor Pertsev V.T. (VSTU) for valuable consultations. Experimental studies were carried out on the basis of the Collective Research Center named after professor Yu.M. Borisov Voronezh State Technical University, which is partially supported by the Ministry of Science and Education of the Russian Federation, Project No. 2021-2296-512-0001-060.

For citation: Rudakov O.B., Barabash D.E., Barabash A.D. Dispersed reinforced radiation-resistant composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 62–67. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-62-67>

В настоящее время строительная отрасль нуждается в материалах, обладающих целым комплексом иногда мало сочетающихся физико-механических и эксплуатационных характеристик. Особенно остро эта проблема наблюдается в отраслях, требующих материалов специального назначения, в особенно-

сти в энергетической и химической промышленности. В первую очередь прогресс в этой сфере связывается с разработкой композитов, совмещающих в себе необходимые параметры, которые невозможно реализовать при применении классических моно-материалов. Композиты на полимерном связующем

при совмещении с минеральными наполнителями и органическими или неорганическими волокнами предоставляют широкие возможности варьирования состава и технологических режимов, что, в свою очередь, позволяет получать конструкции с заданными полифункциональными характеристиками. Применение таких композиционных материалов служит повышению безопасности и надежности сооружений, увеличивает срок их эксплуатации [1, 2].

В атомной отрасли существует проблема создания защитных экранов, изготовленных из материалов, эффективно поглощающих как гамма-излучение, так и нейтронный поток. К числу таких материалов относятся полимерные композиты, содержащие эффективные поглотители указанных излучений [3, 4].

Полимерный композит, применяемый для изготовления конструкций защиты от излучения низких энергий, должен содержать не менее 0,5% водорода от массы. В свою очередь, для упругого рассеяния нейтронов используются материалы, имеющие в своем составе вещества с большой атомной массой [4–7].

Ранее рассматривался вопрос получения радиационно стойкого композита, получаемого на основе неизоцианатного полиуретана, синтезированного в результате нетрадиционных реакций уретанообразования [5–7]. Исходными продуктами получения указанных полиуретанов служат гидроксилсодержащие компоненты, определяющие основной комплекс физико-механических свойств полиуретанов, например олигогликоли, сложные полиэфиры с концевыми группами -ОН [5–9]. В течение последнего десятилетия отечественными и зарубежными исследователями в достаточной степени изучены реакции образования гидроксиуретанов в результате взаимодействия циклокарбонатов с аминами [8, 9].

Авторами для получения радиационно стойкого композита (РСК) использовался олигоэфир с концевыми циклокарбонатными группами и аминный отвердитель – диэтилентриамин [5–7, 10]. Соблюдение стехиометрических соотношений указанных компонентов обеспечивало прочность матрицы при сжатии не менее 18 МПа.

Вместе с тем полученная матрица, как и любой другой полимер, обладала рядом недостатков, наиболее существенные из которых – сильная зависимость значений физико-механических характеристик от температуры и сложно прогнозируемая долговечность при радиационном разогреве [4, 7, 11].

Известный способ улучшения деформационно-прочностных свойств и увеличения долговечности – введение в состав композитов армирующих материалов. Введение волокон позволяет получать необходимую прочность композита без использования классического армирования [12, 13]. Помимо увеличения прочности, дисперсное армирование повышает сопротивление материала ударным нагрузкам и улучшает трещиностойкость.

Кроме того, высокодисперсные частицы, не взаимодействующие с полимерным связующим, иници-

руют структурообразование на границе раздела «частица – полимер», что способствует формированию более однородной надмолекулярной структуры [14].

Параметры полимерных композитов зависят от характеристик составляющих компонентов, их соотношения и характера взаимодействия на границе раздела «наполнитель – связующее».

Полная деформация трехмерных армированных полимеров включает в себя как упругие, так и высокоэластические деформации. При одноосном напряженно-деформированном состоянии полную деформацию описывают уравнением Максвелла:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma - E_{\infty}\varepsilon_{вз}}{\eta} \exp\left(\frac{\sigma - E_{\infty}\varepsilon_{вз}}{m}\right), \quad (1)$$

где ε – полная деформация (экспериментально определяемое относительное удлинение); $\varepsilon_{вз}$ – высокоэластическая деформация; E и E_{∞} – соответственно модули упругости и высокоэластичности; σ – напряжение; t – время; η – коэффициент начальной вязкости высокоэластической деформации; m – модуль скорости.

Полученная авторами полимерная матрица обладала как упругими, так и высокоэластическими деформациями. Для увеличения значений модуля упругости с сохранением радиационно-защитных свойств использовали комплексный наполнитель – смесь порошка лимонита ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) с удельной поверхностью 310–340 м²/г и стеклосфер диаметром 15–20 мкм состава $\text{Na}_2\text{O} \approx 7,5\%$; $\text{B}_2\text{O}_3 \approx 12\%$; $\text{SiO}_2 \approx 80,5\%$ в соотношении 10:1.

Достаточно большое содержание связанного водорода в лимоните обеспечивало дополнительный захват и торможение нейтронов средних энергий, а стеклосферы, помимо благоприятного химического состава, выступали в роли пластификаторов механического типа. Указанное соотношение было установлено ранее в работах [5–7, 16]. Для сохранения способности композита ослаблять нейтронный поток и обеспечения приемлемой прочности при сжатии доля наполняющей группы в составе композита не превышала 20%. Кроме того, указанная степень наполнения обеспечивала вязкость не выше 60–65 Па·с, что позволяло применять литьевую технологию изготовления изделий. При таком наполнении удалось достичь прочности образцов при сжатии 26,6 МПа с линейным коэффициентом ослабления 0,665 см⁻¹.

Для дисперсного армирования применяли:

- нити алюмоборосиликатные стеклянные однонаправленные длиной 8 мм, марки БВ6, номинальный диаметр – 6 мкм (ГОСТ 10727–91 «Нити стеклянные однонаправленные. Технические условия»);
- нити полиамидные длиной 10–12 мм, диаметр – 20 мкм (ТУ 6-13-2–99).

Выбор указанных нитей для дисперсного армирования вызван необходимостью получения данных о влиянии вида материала нитей и их размеров на напряженно-деформированное состояние кон-

струкций, изготовленных из композиционного материала.

Поскольку введение указанных компонентов неизбежно увеличивает вязкость системы, авторами было установлено граничное значение 80–82 Па·с, обусловленное требованием литьевой технологии, при превышении которого наполнение прекращали.

Для определения продольных и поперечных деформаций наполненного композита, в зависимости от вида и количества применяемых армирующих нитей, испытывали на сжатие образцы размерами 40×40×160 мм.

Испытания и обработку результатов проводили согласно ГОСТ 24452–80 «Бетоны. Методы определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» в условиях кратковременного центрального нагружения на гидравлическом прессе со средней скоростью нагружения 5 МПа/мин. При этом для обоих видов армирующих нитей установлена четкая граница наполнения, связанная с технологическим параметром — вязкостью. Наибольший вклад в увеличение вязкости вносит количество полиамидных нитей в сравнении с таким же количеством стеклянных.

Граничное значение вязкости 80 Па·с достигалось введением 22 и 14% по объему стекловолокна и полиамидного волокна соответственно.

Результаты испытаний представлены в таблице.

Необходимо отметить, что увеличение температуры смеси ожидаемо ведет к снижению вязкости, но при этом повышает вероятность неконтролируемого ускорения отверждения смеси и росту энергетических затрат на изготовление материала.

Максимальное значение прочности при сжатии 28,8–28,6 МПа для композитов, содержащих от 18 до 22% стекловолокна, соответствовало предельной вязкости исходной смеси.

Увеличение содержания полиамидных нитей свыше 14% сопровождалось снижением значений прочности при сжатии. Очевидно, что с превышением указанных значений армирования полимерная смесь приобретает неоднородность, сказывающуюся на физико-механических свойствах композита. Общим для указанных наполнителей явился незначительный прирост прочности при сжатии в сравнении с базовой прочностью. Так, для стекловолокна прирост составил 7,6%, а для полиамидного — 5,6%.

Зависимости «напряжение — деформация» определяются при помощи испытания образцов в форме двойной лопатки с соотношением длины образцов к его максимальному поперечному размеру 5/1. Исследуемые образцы фиксируются в зажимах разрывной установки и растягиваются при постоянной скорости их взаимного перемещения. Скорость развития деформации устанавливалась не более 5 мм/мин с учетом релаксационного характера механических свойств.

Экспериментальное исследование включает несколько этапов.

Результаты испытаний на сжатие образцов с различным содержанием армирующих нитей
Results of tests for compression of samples with various maintenance of the reinforcing threads

Материал нитей	Содержание нитей, % по объему	Вязкость, Па·с	Прочность при сжатии, МПа
Стекловолокно	6	66,2	27,4
	10	68,5	27,8
	14	76,2	28,1
	18	78,6	28,8
	22	80,5	28,6
	26	83,4	27,6
Полиамид	6	69,3	27,9
	10	72,2	28,1
	12	79,7	28,2
	14	80,3	28,1
	16	85,2	26,9

На первом этапе находили собственные деформационные характеристики полимерного связующего путем определения зависимости « σ — ε » при постоянной температуре испытаний. Упругие деформации связующего наблюдались до 80% относительного удлинения; в пределах от 100 до 180% отмечалось пластическое течение с образованием «шейки», далее происходило разрушение образцов. Полученные данные характерны для больших деформаций с реализацией текучести.

Для полимерной матрицы зависимость напряжений σ от кратности удлинения λ в упругой стадии адекватно описывалась уравнением:

$$\sigma = 2,13(\lambda - \frac{1}{\sqrt{\lambda}}). \quad (2)$$

Второй этап включает в себя исследование влияния степени наполненности смеси армирующими нитями на ее вязкость с последующим определением деформационных параметров образцов, изготовленных из смесей заданной вязкости. Для каждого соотношения армирующих компонентов, обеспечивающих заданную вязкость, устанавливается соотношение « λ — σ ». Экспериментально полученные диаграммы « λ — σ » представлены на рис. 1.

В результате анализа диаграмм установлено, что наполнение композита стекловолокном ведет к уменьшению области упругих деформаций. На графике четко определяются точки, соответствующие границе пропорциональности между усилием и деформацией. У ненаполненного связующего точка соответствует 100%, при введении полиамидных волокон — 43% (кривая 3), при введении стекловолокна — 20% (кривая 5). При армировании стекловолокном образцы разрушались без пластического течения, в то время как у образцов с полиамидными нитями зависимость деформаций от напряжения аналогична соответствующей зависимости ненаполненной матрицы

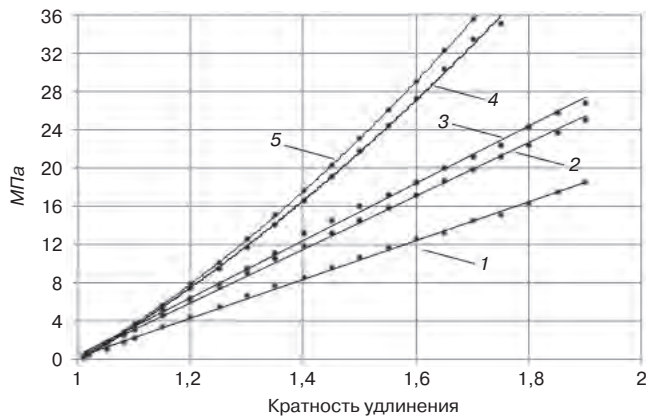


Рис. 1. Изменение напряжения в образцах РСК от кратности удлинения и температуры испытания: 1 – данные для образцов без армирования (1) $T=25^{\circ}\text{C}$; 2, 3 – с полиамидными нитями при $T=50$ и 25°C соответственно; 4, 5 – со стекловолокном при $T=50$ и 25°C соответственно

Fig. 1. Change in stress in RSC specimens from the elongation factor and test temperature: 1 – data for specimens without reinforcing (1) $T=25^{\circ}\text{C}$; 2, 3 – with polyamide threads at $T=50$ and 25°C , respectively; 4, 5 – with glass fiber at $T=50$ and 25°C , respectively

вплоть до кратности растяжения 1,8. При разрыве образцов со стекловолокном отмечались отдельные волокна в зоне разрыва, что свидетельствовало об их вырывании из полимерной составляющей; при этом сама зона представляла собой практически плоскую поверхность. Зона разрушения образцов с полиамидными волокнами имела вид сужающегося конуса без волокон, что свидетельствовало об их разрыве.

Введение волокон ожидаемо способствовало упрочнению образцов. Предельная растяжимость ненаполненных образцов выше в 1,5 раза, чем у образцов, армированных стекловолокном. Напряжения, возникающие при одинаковых значениях кратности растяжения, в наполненных волокнами образцах выше, чем в ненаполненных, в среднем на 18–20%.

Армирующие наполнители достаточно четко определяют характер разрушения композиции. Полиамидное волокно позволяет реализоваться текучести, тогда как стекловолокно обуславливает практически хрупкое разрушение.

Известно, что повышение температуры вносит коррективы в динамику развития деформаций у полимеров. Так, на рис. 1 кривые 4, 2 отражают изменение характера развития деформаций при повышении температуры до 50°C .

В процессе исследования образцов при указанной температуре отмечали смещение области упругих деформаций в сторону увеличения. Соответственно снижались значения напряжений, хотя и несущественно. Полученные результаты подтверждают повышение теплостойкости полученного композита при введении армирующих волокон.

Следует отметить, что при кратности растяжения вплоть до $\lambda=1,4$ значения напряжений для всех видов используемых волокон различались не более чем на 7%. Учитывая условия работы таких композитов, где растяжение не является эксплуатационным признаком, следует отнести армированные композиции к теплостойким материалам.

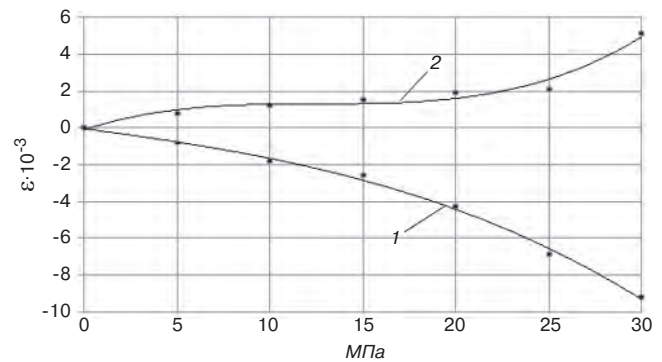


Рис. 2. Продольные (1) и поперечные (2) деформации при сжатии РСК без армирования, $T=25^{\circ}\text{C}$

Fig. 2. Longitudinal (1) and cross (2) deformations at compression of RSK without reinforcing, $T=25^{\circ}\text{C}$

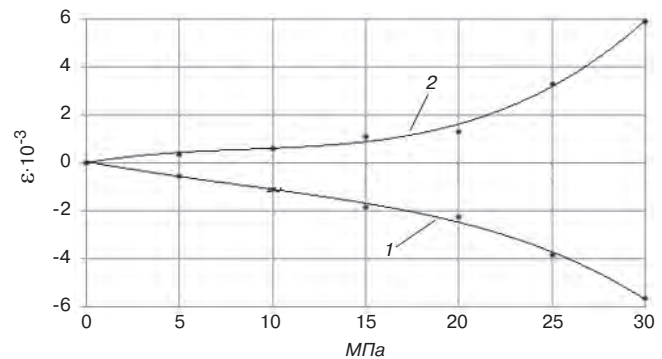


Рис. 3. Продольные (1) и поперечные (2) деформации при сжатии РСК с полиамидными нитями, $T=50^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. Longitudinal (1) and cross (2) deformations at compression of RSK with polyamide threads, $T=50^{\circ}\text{C}$

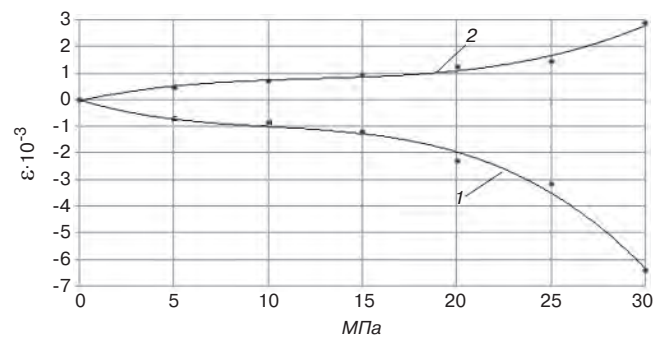


Рис. 4. Продольные (1) и поперечные (2) деформации при сжатии РСК со стекловолокном, $T=50^{\circ}\text{C}$

Fig. 4. Longitudinal (1) and cross (2) deformations at compression of RSK with fiber glass, $T=50^{\circ}\text{C}$

Для получения более подробной информации о поведении армированных композиций при изменении температуры провели испытания образцов-цилиндров на сжатие при фиксированной скорости нагружения. В ходе экспериментальных исследований отмечали изменение продольных и поперечных деформаций в образцах и появление дефектов, предвещающих разрушение.

Для сравнения на рис. 2 представлены результаты исследования исходного связующего без армирующих компонентов, а на рис. 3 и 4 – для армированных композиций.

Приведенные графики свидетельствуют об однотипном характере развития продольных и поперечных деформаций. При значении напряжений 0,7–0,8 от предельных для армированных образцов эта зависимость практически линейна.

Дальнейшее изменение характера кривых обусловлено реализацией пластических свойств полимерной составляющей, причем с ростом температуры соотношение $\varepsilon_{\text{поп}}/\varepsilon_{\text{прод}}$ в начале пластического течения у образцов со стекловолокном составляло 0,47 против 0,77 у образцов с полиамидными волокнами.

Полученные сведения обеспечивают выбор рациональной области использования радиационно-стойких композитов, в том числе и с учетом радиационного разогрева, вплоть до температуры 50°C.

Для полученных составов были определены значения коэффициентов ослабления гамма-излучений с энергией 3 МэВ. Так, для образцов, содержащих стекловолокно, среднее значение коэффициента составило 0,789, а для образцов с полиамидными волокнами – 0,782 см⁻¹.

Список литературы

1. Королев Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения // *Academia. Архитектура и строительство*. 2020. № 3. С. 143–159. DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2020-3-143-159>.
2. Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм // *Строительные материалы*. 2018. № 1–2. С. 60–62. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-756-1-2-60-62>
3. Алфимова Н.И. Современные тенденции развития радиационно-защитного материаловедения // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 4. С. 20–25. DOI: https://doi.org/10.12737/article_58e24bcd42faa5.10006763.
4. Шейченко М.С., Алфимова Н.И., Вишневская Я.Ю. Современные композиционные радиационно-защитные материалы строительного назначения // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 5. С. 15–19. DOI: https://doi.org/10.12737/article_590878fa94e168.59204031
5. Barabash D.E., Barabash A.D., Potapov Yu.B., Panfilov D.V., Perekalskiy O.E. Radiation-resistant composite for biological shield of personnel. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport – EMMFT*. 2017. Vol. 90. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012085>
6. Barabash A.D., Barabash D.A., Pertsev V.T., Panfilov D.V. Polymer composite materials for radiation protection. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and*

Заключение

Предложено для объектов атомной отрасли использовать дисперсно-армированные композиты, способные обеспечить защиту от радиации и обладающие удовлетворительными конструктивными свойствами, в которых в качестве связующего применен неизоцианатный полиуретан, полученный из олигоэфиров с концевыми циклокарбонатными группами и диэтилентриамином. Данное связующее обеспечивает эффективное поглощение гамма-излучения и нейтронного потока. Для повышения устойчивости к радиационному разогреву и повышению прочности и долговечности материала экрана предложено армировать его полиамидными и стеклянными волокнами. Определено рациональное содержание наполняющей группы, обеспечивающее необходимую технологическую вязкость, соответствующую литьевому способу изготовления изделий. Введение армирующих волокон позволяет одновременно улучшать физико-механические характеристики и обеспечивать дополнительное увеличение коэффициента ослабления гамма-излучений.

References

1. Korolev E.V. Prospects for the development of construction materials science. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2020. No. 3, pp. 143–159. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2020-3-143-159>
2. Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev E.V. Evolution of representations about composite materials from the positions of changing the paradigm. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 1–2, pp. 60–62. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-756-1-2-60-62> (In Russian).
3. Alfimova N.I. Modern trends in the development of radiation-protective materials science. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 4, pp. 20–25. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.12737/article_58e24bcd42faa5.10006763.
4. Sachenko M.S., Alfimova N.I., Vishnevskaya J.Yu. Modern radiation-protective composition materials for construction purposes *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 5, pp. 15–19. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.12737/article_590878fa94e168.59204031
5. Barabash D.E., Barabash A.D., Potapov Yu.B., Panfilov D.V., Perekalskiy O.E. Radiation-resistant composite for biological shield of personnel. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport – EMMFT*. 2017. Vol. 90. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012085>
6. Barabash A. Barabash D, Pertsev V.T., Panfilov D.V. Polymer composite materials for radiation protection. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018*. Springer International

- Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. Springer International Publishing. 2018, pp. 352–360. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_36*
7. Барабаш Д.Е., Барабаш А.Д. Технология получения радиационно-защитных композитов заданной вязкости. *Эффективные строительные конструкции: теория и практика: Сборник статей XVII Международной научно-технической конференции. 2017. Пенза: АНМО «Приволжский дом знаний», 2017. С. 14–17.*
 8. Parcheta P., Głowińska E., Datta J. Effect of bio-based components on the chemical structure, thermal stability and mechanical properties of green thermoplastic polyurethane elastomers. *European Polymer Journal*. 2020. 2:109422. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.109422>
 9. Piotr Stachak, Izabela Łukaszewska, Edyta Hebda, Krzysztof Pielichowski. Recent advances in fabrication of non-isocyanate polyurethane-based composite materials. *Materials*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14133497>
 10. Барабаш А.Д., Барабаш Д.Е. Полимерные пластификаторы механического типа в производстве радиационно-стойких композитов // *Химия, физика и механика материалов*. 2020. Вып. 3 (26). С. 50–59.
 11. Бормотов А.Н. Математический метод синтеза композитов на основе функционалов качества кинетических процессов // *Современное строительство и архитектура*. 2020. № 1 (17). С. 29–35.
 12. Моцейкис Р., Кичайте А., Скрипкюнас Г., Яковлев Г.И. Механические характеристики и пластичность армированного стекловолокном бетона с модифицированной матрицей // *Строительные материалы*. 2018. № 12. С. 27–33. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-766-12-27-33>
 13. Смирнова О.М., Андреева Е.В. Свойства тяжелого бетона, дисперсно-армированного синтетическим волокном // *Строительные материалы*. 2016. № 11. С. 11–20.
 14. Боровков А.В., Овчинникова С.В. Технико-экономическое сравнение эффективности применения фибробетона на основе фибры различного происхождения // *Инженерный вестник Дона*. 2020. № 11 (71). С. 259–270.
 15. Барабаш А.Д., Барабаш Д.Е. Особенности проектирования рецептур коррозионно-стойких материалов на основе жидких каучуков // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. Вып. 9. С. 47–54.
 16. Барабаш А.Д., Барабаш Д.Е. Пластификаторы механического типа в производстве полимерных композитов. *Эффективные строительные конструкции: теория и практика: Сборник статей XX Международной научно-технической конференции / Под ред. Н.Н. Ласькова. 2020. С. 21–24. Publishing. 2018, pp. 352–360. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_36*
 7. Barabash D.E., Barabash A.D. Technology of reception of radiation-protective composites of the set viscosity. *Effective Building Structures: Theory and practice. Collection of articles of the XVII International Scientific and Technical Conference*. 2017. Penza. 2017, pp. 14–17. (In Russian).
 8. Parcheta P., Głowińska E., Datta J. Effect of bio-based components on the chemical structure, thermal stability and mechanical properties of green thermoplastic polyurethane elastomers. *European Polymer Journal*. 2020. 2:109422. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.109422>
 9. Piotr Stachak, Izabela Łukaszewska, Edyta Hebda, Krzysztof Pielichowski. Recent advances in fabrication of non-isocyanate polyurethane-based composite materials. *Materials*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14133497>
 10. Barabash A.D. Barabash D.E. Polymeric softeners of mechanical type in production of radiation and resistant composites. *Khimiya, fizika i mekhanika materialov*. 2020. Vol. 3 (26), pp. 50–59. (In Russian).
 11. Bormotov A.N. Mathematical method for the synthesis of composites based on the quality functionals of kinetic processes. *Sovremennoye stroitel'stvo i arkhitektura*. 2020. No. 1 (17), pp. 29–35. (In Russian).
 12. Mocekis R., Kičaitė A., Skripkiūnas G., Yakovlev G.I. Mechanical characteristics and ductility of glass fiber reinforced concrete with modified matrix. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2018. No. 12, pp. 27–33. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-766-12-27-33> (In Russian).
 13. Smirnova O.M., Andreeva E.V. Properties of heavy concrete, dispersed-reinforced with synthetic fiber. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2016. No. 11, pp. 11–20. (In Russian).
 14. Borovkov A.V., Ovchinnikova S.V. Technical and economic comparison of the effectiveness of the use of fiber-reinforced concrete based on fibers of various origins. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2020. No. 11 (71), pp. 259–270. (In Russian).
 15. Barabash A.D., Barabash D.E. Design features of the formulations of corrosion-resistant materials based on liquid rubbers. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2017. Iss. 9, pp. 47–54. (In Russian).
 16. Barabash A.D., Barabash D.E. Softeners of mechanical type in production polymeric composites. *Effective Building Structures: Theory and practice. Collection of articles of the XX International Scientific and Technical Conference. Edited by N.N. Las'kov*. 2020, pp. 21–24. (In Russian).

Как подготовить к публикации научно-техническую статью



Журнальная научно-техническая статья — это сочинение небольшого размера (до пяти журнальных страниц), что само по себе определяет границы изложения темы статьи.

Необходимыми элементами научно-технической статьи являются:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;
- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение ранее не решенных частей общей проблемы, которым посвящена статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных результатов;
- выводы из данного исследования и перспективы дальнейшего поиска в избранном направлении.

Научные статьи рецензируются специалистами. Учитывая открытость журнала «Жилищное строительство» для ученых и исследователей многих десятков научных учреждений и вузов России и СНГ, представители которых не все могут быть представлены в редакционном совете издания, желательно представлять одновременно со статьей отношение ученого совета организации, где проведена работа, к представляемому к публикации материалу в виде сопроводительного письма или рекомендации.

Библиографические списки цитируемой, использованной литературы должны подтверждать следование автора требованиям к содержанию научной статьи.

НЕ РЕКОМЕНДУЕТСЯ:

1. Включать ссылки на федеральные законы, подзаконные акты, ГОСТы, СНИПы и др. нормативную литературу. Упоминание нормативных документов, на которые опирается автор в испытаниях, расчетах или аргументации, лучше делать непосредственно по тексту статьи.

2. Ссылаться на учебные и учебно-методические пособия; статьи в материалах конференций и сборниках трудов, которым не присвоен ISBN и которые не попадают в ведущие библиотеки страны и не индексируются в соответствующих базах.

3. Ссылаться на диссертации и авторефераты диссертаций.

4. Самоцитирование, т. е. ссылки только на собственные публикации автора. Такая практика не только нарушает этические нормы, но и приводит к снижению количественных публикационных показателей автора.

ОБЯЗАТЕЛЬНО следует:

1. Ссылаться на статьи, опубликованные за последние 2–3 года в ведущих отраслевых научно-технических и научных изданиях, на которые опирается автор в построении аргументации или постановке задачи исследования.

2. Ссылаться на монографии, опубликованные за последние пять лет. Более давние источники также негативно влияют на показатели публикационной активности автора.

Несомненно, что возможны ссылки и на классические работы, однако не следует забывать, что наука всегда развивается поступательно вперед и незнание авторами последних достижений в области исследований может привести к дублированию результатов, ошибкам в постановке задачи исследования и интерпретации данных.

ВНИМАНИЕ! С 1 января 2020 г. изменены требования к оформлению статей. Обязательно ознакомьтесь с требованиями на сайте издательства в разделе «Авторам»!

Статьи, направляемые для опубликования, должны оформляться в соответствии с техническими требованиями изданий:

- текст статьи должен быть набран в редакторе Microsoft Word и сохранен в формате *.doc или *.rtf и не должен содержать иллюстраций;
- графический материал (графики, схемы, чертежи, диаграммы, логотипы и т. п.) должен быть выполнен в графических редакторах: CorelDraw (не выше v.12), Adobe Illustrator (не выше v.CS6) и сохранен в форматах *.cdr, *.ai, *.eps соответственно. Сканирование графического материала и импортирование его в перечисленные выше редакторы недопустимо;
- иллюстративный материал (фотографии, коллажи и т. п.) необходимо сохранять в формате *.tif, *.psd, *.jpg (качество «8 – максимальное») или *.eps с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 115 мм по ширине, цветовая модель CMYK или Grayscale.

Материал, передаваемый в редакцию в электронном виде, должен сопровождаться: рекомендательным письмом руководителя предприятия (института); лицензионным договором о передаче права на публикацию; **распечаткой, лично подписанной авторами**; рефератом объемом не менее 100 слов на русском и английском языках; подтверждением, что статья предназначена для публикации в журнале «Строительные материалы», ранее нигде не публиковалась и в настоящее время не передана в другие издания; сведениями об авторах с указанием полностью фамилии, имени, отчества, ученой степени, должности, контактных телефонов, почтового и электронного адресов. Иллюстративный материал должен быть передан в виде оригиналов фотографий, негативов или слайдов, распечатки файлов.

В 2006 г. в журнале «Строительные материалы»[®] был опубликован ряд статей «Начинающему автору», ознакомиться с которыми можно на сайте журнала www.rifsm.ru/files/avtoru.pdf

Подробнее можно ознакомиться с требованиями на сайте издательства
<http://rifsm.ru/page/7/>

или журнала <http://journal-cm.ru/index.php/ru/avtoram>



КОМПОЗИТ-ЭКСПО

Пятнадцатая международная специализированная выставка

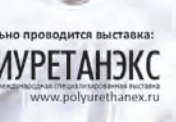
28–30 марта 2023

Россия, Москва,
ЦВК «Экспоцентр», павильон 1

Основные разделы выставки:

- Сырье для производства композитных материалов, компоненты: Наполнители и модификаторы
- Стеклопластик (пластик, армированный стекловолокном), углепластик (пластик, армированный углеродным волокном), графитопластик, базальтопластик, базальтовые волокна, древесно-полимерный композит (ДПК), искусственный камень, искусственный мрамор, металлокомпозиты, нанокомпозиты, биокомпозиты и т.д.
- Полуфабрикаты (препреги)
- Инженерные пластики
- Промышленные (готовые) изделия из композитных материалов
- Оборудование и технологическая оснастка для производства композитных материалов
- Инструмент для обработки композитных материалов
- Измерительное и испытательное оборудование
- Компьютерное моделирование

Специальный раздел выставки: КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ



Информационная поддержка:



Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»
115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, дом 7, строение 10, офис 507
Тел.: 8 495 988-1620 | E-mail: info@composite-expo.ru | Сайт: www.composite-expo.ru

YouTube youtube.com/user/compoexporussia **Twitter** @compoexporus **Telegram** @ocompo

Организатор:



ПОЛИУРЕТАНЭКС

Четырнадцатая международная специализированная выставка

28 - 30 марта 2023

Россия, Москва,
ЦВК «Экспоцентр», павильон 1

Основные разделы выставки:

- Сырье для производства полиуретанов
- Оборудование и станки для производства и переработки полиуретанов
- Обслуживание
- Тестовое оборудование
- Конечная продукция
- Производство лакокрасочных материалов (ЛКМ)
- Использование полиуретанов в:
 - машиностроении, - автомобилестроении, - строительстве (теплоизоляция),
 - железнодорожном транспорте (вкл. вагоностроение), - авиационном транспорте, - трубопроводном транспорте, - электротехнике, - изготовлении товаров бытового назначения, - обувной промышленности, - легкой промышленности, - медицине, - мебельной промышленности, - химической промышленности, - строительной индустрии, - горнообогатительной промышленности, - металлургии.

Специальный раздел выставки: КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ



Информационная поддержка:



Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»
115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, дом 7, строение 10, офис 507
Тел.: 8 495 988-1620 | E-mail: info@polyurethanex.ru | Сайт: www.polyurethanex.ru

YouTube youtube.com/user/polyexporus **Twitter** @polyexporus

Организатор:



100+ TECHNO BUILD

IX Международный
строительный форум
и выставка

forum-100.ru

18-21 октября 2022
Екатеринбург



стать экспонентом

13 000
посетителей

235
экспонентов

500
спикеров

120
секций

25
стран

*показатели 2021 года